



物理系列

Quantum
Generations

量子世代

[丹] 赫尔奇·克劳 / 著 洪定国 / 译



第一推动

湖南科学技术出版社

Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century

Copyright 1999 by Princeton University Press

All rights reserved.

湖南科学技术出版社通过博达著作权代理有限公司获得本书中文简体版

中国大陆地区出版发行权

著作权合同登记号: 18-2007-232

图书在版编目(CIP)数据

量子世代 / (丹) 郝尔奇·克劳(Kragh, H.) 著; 洪定国译.
长沙: 湖南科学技术出版社, 2009. 3

(第一推动丛书. 物理系列)

ISBN 978-7-5357-5628-2

I. 量… II. ①克…②洪… III. 物理学史—普及读物
IV. 04-09

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第026510号

第一推动丛书 物理系列

量子世代

著 者: [丹] 郝尔奇·克劳

译 者: 洪定国

责任编辑: 吴 炜 戴 涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路276号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-4375808

印 刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市青园路6号

邮 编: 410004

出版日期: 2009年4月第1版第1次

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 18.25

字 数: 430000

书 号: ISBN 978-7-5357-5628-2

定 价: 39.50 元

(版权所有·翻印必究)

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教



育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的

世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会

前 言

本书是因为普林斯顿大学出版社的建议，而于 1996 和 1998 年间撰写的。原先，当我接受撰写一本关于物理学 20 世纪发展的著作的邀约时，我觉得那会是一件相对容易的事。然而不久，我就理智地认识到，要撰写一本全面而合理地综合论述 20 世纪的物理学，简直是不可能的。取代的做法是这样的：20 世纪是最重要的物理学世纪，对我所认为的在这个世纪内物理学的思想和实验最重要的一些发展，作一个相当扼要、极度浓缩和有选择的介绍。

本书分三个大的按时序编撰的部分。第一部分涵盖从 19 世纪 90 年代到 1918 年第一次世界大战末的发展。第二部分跨度为 1918~1945 年，集中介绍两次世界大战之间的各种发展。第三部分则收集了 20 世纪的其余发展。时期的选择是毋庸置疑的，决定从 19 世纪末而不从 1900 年开始也是毋庸置疑的。“现代物理学”始于 19 世纪 90 年代一系列伟大的发现，而非始于 1900 年普朗克引入量子的非连续性，这一见地是世人的共识。

我努力就物理学的一些重大进展的历史和现状给出说明，因而包容了一些通常会把它们视为“还不是历史的”、十分现代的



发展。有些新近的发展是以历史的眼光来讲的，因为这些实际的问题，并非植根于当代科学，它们是超越历史分析的。本书摒弃试图包罗万象的任何野心，书的篇幅也不允许包罗万象，因此，本书是不论及完全性的。无论如何，一部关于 20 世纪物理学的“完全的”历史，也许正如从实际的观点来看不可能写出来一样，是要打零分的。像大多数历史著作一样，本书在范围和内容上是选择的和有限的。选择的视界无疑会有可置疑之处。我所选用的材料有许多根据，其中之一是历史著作和历史分析的有效性。本书的目标是对于物理学在一百年内那些已被消化、有信息量和颇具代表性的发展给出一个说明。无疑，有许多有趣的论题和次级学科未被收录，部分原因是受篇幅所限，部分原因是缺乏次级文献。原先我想纳入但到头来非得删去不可的论题有：光学、材料科学、化学物理学、几何光学、医学物理学、第三世界国家中的物理学，还有 1950 年以后涉及量子力学解释的讨论。尽管选择准则多少有点武断，但我仍然认为已收录的材料并不严重背离代表现代物理学发展的总趋势。

结合平衡是一个困难的问题，它不仅涉及次级学科和维度，而且涉及国度。物理学是、而且一直总是国际性的，当然，有些国家对科学进展的贡献比别的一些国家更引人注目。我的叙述实质上是一部欧洲与北美的物理学史，本书也提及日本的一些贡献。它反映了对于物理学的重要贡献，在国度和地域分布上是不平衡的。不论人们喜欢与否，在现代物理学的发展中，大多数国度几乎没有发挥丝毫作用。战后时期一个重要的趋势是，美国物理学在科学中一直占据领军地位，取代了战前的欧洲。由于这种主导作用以及美国学者在科学史中的强大地位，现代美国物理学的历史知识，要比欧洲和其他地区（包括前苏联），丰富得多。也许，由于美国物理学著作的相对优势，使我的叙述过多地集中于美国方面，但情况如此，我也是不得已而为之。

总的来说，不论就论题和学科还是就物理学的维度而言，20 世纪涵盖了物理学的一个广大领域。我们总应该记住：物理学（或物理科学）是一个丰富而多面的领域，具有远远超出相关于基本物理学的纯科学侧面的诸多蕴涵。我一直想写一本在各科学领域涉猎广泛，但又不致广泛到丧失对于物理学世界的聚焦的书。这本书并非致力于物理学的科学或智力侧面，也非集中于社会与机构的历史。它试图把诸多应用学科整合起来，或至少，以一种合理的方式包容它们。对于应用物理学或工程物理学，我比通常所做的赋予了更多的注意，如果忽略物理学-技术层面而仅集中于所谓的基础物理学，肯定会对于物理学在 20 世纪的发展给出一幅畸变的图像。事实上许多世界级的物理学家统率着其科学的应用侧面，在 20 世纪的大部分时期一直如此，而且，物理学成为社会变化一支主要力量，也主要是通过各种技术的应用。

本书所针对的读者层主要不是物理学家或科学史方面的专家。我的希望是：它有更大的读者群，它可作为交叉学科课程或物理学史的导论课程的一种教科书。除个别例外，我避免使用数学方程。虽然预先假设读者有某种物理学知识，但本书主要是以初级水平撰写的。我决定不用常被视为学术著作标志的注释，为的是使本书更容易接近读者，而不去迎合更具学术性著作的（有时相当人为的）注释系统。在大多数情况下，我不参考原始文献，而参考后来的二级文献，那常常是我偶尔拾取引文的地方。在一部科普性的著作中，充斥大量《物理学纪事》[德]（*Annalen der Physik*）或《哲学杂志》[英]（*Philosophical Magazine*）中的旧论文，是要貽笑大方的；那些可能想要挖掘原始文献的读者可通过我所引用的文献去查找。本书在很大程度上是基于二级文献，特别是基于许多物理科学的史学家们所撰写的好著作与好论文。我也自由而广泛地引用了本人研究现代物理学、化学、技术学和宇宙学的历史的一些早先著作。



相对于最后三分之一或四分之一世纪来说，有些问题是很不同的。一方面有大量由史学家或参与者撰写的研究物理学较早发展的二级文献，但对于1960年以后物理学的历史分析却寥寥无几（高能物理学是个例外）。在这个时序部分，我不得不把我的解说放在偶然存档的资料、物理学家们多少有历史信息量的对往事的追忆以及我在科学论文与评论中所发现的不太系统的论述中。《今日物理》（*Physics Today*）一直是个有用的资源；第三部分中取自这个期刊的文献记为PT。想更深入了解本书所覆盖的各个主题的读者，可参阅本书列出的附录，那里有供“进一步阅读”的大量文献。

本书的实际标题原来是“经由传统的革命”。我想以此指出现存理论与革命变化之间的辩证关系，这关系一直是20世纪物理学的特征。在理论的经典传统中，的确一直存在许多革命，但这些革命并未全盘抛弃经典传统；相反，它们跟牛顿、麦克斯韦、亥姆霍茨物理学的实质部分一直有着坚实的联系。相对论和量子力学是20世纪物理学思想中两个主要的革命，无疑，它们是细心地构建起来的，以便在经典极限下对应于现存理论。

在量子力学完成后所发生的一切理论变化中，对于传统的尊重，同样一直是一个特征性主题。就这些变化所冠以“革命”一词而言，它们是一些保守的革命。这些变化在方法论水平上的重要性，远远不及认知水平上的重要性。确实存在一些变化，但不属于根本性的。19世纪90年代科学所认可的方法，基本上跟18世纪90年代所认可的方法一样。如果我们要寻找这世纪最后四分之三时期内真正根本的变化，那么，不应该到方法、概念结构或物理学的认知方面去寻找，而应该到这世界的基本结构、物理学的本体论中去寻找；或者，我们应该看到社会的、经济的、政治的维度。用人力、组织、金钱和政治的（与军事）价值的眼光看，1945年以后的年代里，物理学经历了显著的移位。社会政治

的变化使 1960 年的物理学成为一门跟一百年前很不同的科学，但在方法论和认知的标准上，它们并未引起一个相应的变化。无论如何，这里不是以任何篇幅讨论这些广泛议题的地方。在接下来的部分，我不加分析地描述了从 1895 ~ 1995 年间物理学发展的主要部分。喜欢大画面（比方说，去评价在一个世纪的过程中的诸多革命性变化并做出比较）的读者，使用这里所提供的材料和信息会很方便。

我要对我的同事 Ole Knudsen 表达我的谢意，他阅读了我的手稿并提出了一些改进意见。

赫尔奇·克劳
于丹麦阿哈斯

目 录

>	第一部分 从坚实到革命	
>	第一章 19 世纪末的物理学：流动中的世界	
	图像	3
>	第二章 物理学的世界	15
	人才与资源	15
	物理期刊	23
	一个日本人眼中的欧洲物理学	27
>	第三章 气体放电及后续事态	32
	一种新的射线	34
	从贝克勒尔射线到放射性	36
	形形色色的假射线	40
	汤姆孙以前的电子	45
	第一个基本粒子	47
>	第四章 原子的建构学	52
	汤姆孙原子	52



	其他的早期原子模型	57
	卢瑟福的有核原子	60
	原子结构的量子理论	63
>	第五章 量子理论的缓慢崛起	68
	黑体辐射	68
	早期关于量子假设的讨论	74
	爱因斯坦与光子	77
	比热容与 1913 年量子理论的地位	80
>	第六章 低温物理学	86
	向零的赛跑	86
	凯末林·昂尼斯和莱顿实验室	89
	超导性	93
>	第七章 爱因斯坦相对论及其他	101
	洛伦兹变换	101
	爱因斯坦相对论	105
	从狭义到广义相对论	109
	接受	114
>	第八章 一场失败的革命	122
	电磁质量的概念	122
	作为一种世界观的电子理论	126
	质量变化实验	130
	一个世界观的沉沦	133
	统一场论	136
>	第九章 工业与战争中的物理学	140
	工业物理学	140
	电子在运作之一：长途电话	144
	电子在运作之二：真空管	148

化学家之战中的物理学·····	152
> 第二部分 从革命到坚实	
> 第十章 德国共和中的科学与政治 ·····	161
科学政策与经济支持 ·····	161
国际关系·····	166
物理学共同体 ·····	172
时代精神与物理世界观 ·····	175
> 第十一章 量子跃迁 ·····	179
量子反常·····	179
海森伯的量子力学 ·····	186
薛定谔方程 ·····	190
传播与接受 ·····	194
> 第十二章 核物理学的崛起 ·····	201
电子-质子模型·····	201
量子力学与原子核 ·····	205
天体物理学的应用 ·····	210
1932 年, 奇迹迭出的一年 ·····	213
> 第十三章 从二粒子到多粒子 ·····	219
反粒子·····	219
来自宇宙射线的惊奇 ·····	223
量子理论中的危机 ·····	228
汤川的重量子 ·····	232
> 第十四章 量子力学的哲学蕴涵 ·····	237
不确定性与互补性 ·····	237
反对哥本哈根解释 ·····	243
量子力学是完全的吗 ·····	248



> 第十五章 爱丁顿的梦与其他异论	251
爱丁顿的基本主义	252
宇宙数字命理学与其他猜测	255
米尔恩与宇宙物理学	257
现代亚里士多德人	261
> 第十六章 物理学与新专制	264
在卍字饰的阴影下	264
北欧日耳曼人物理学	271
墨索里尼时期的意大利物理学	274
物理学, 辩证唯物主义	276
> 第十七章 人才流出与人才流入	281
30 年代的美国物理学	281
智力移民	286
> 第十八章 从铀的迷惑到广岛	294
通向裂变的道路	294
比月光更亮	298
走向原子弹	304
两个城市的毁灭	308
> 第三部分 进展与问题	
> 第十九章 核主题	317
原子核物理学	317
现代炼金术	321
核能的希望与危机	324
受控聚变能	329
> 第二十章 军事化与大趋势	335
物理学——一个军事分支	335

	大机器·····	343
	欧洲一项大的科学冒险·····	351
>	第二十一章 发现各种粒子·····	355
	主要的介子·····	355
	弱相互作用·····	361
	夸克·····	366
	粒子物理学的成长·····	370
>	第二十二章 各种基本理论·····	379
	QED·····	379
	场论的沉与浮·····	384
	规范场与电弱统一·····	388
	量子色动力学·····	393
>	第二十三章 宇宙学与相对论的复兴·····	398
	趋向大爆炸宇宙·····	398
	稳态的挑战·····	404
	1960 年以后的宇宙学·····	407
	广义相对论的复兴·····	412
>	第二十四章 固体物理学初步·····	418
	1940 年以前的固体·····	418
	半导体与固体物理学共同体的崛起·····	423
	超导性的突破·····	429
>	第二十五章 工程物理学与量子电子学·····	436
	从晶体管开始·····	436
	微波、激光和量子光学·····	441
	光纤·····	447



>	第二十六章 科学受到攻击——物理学处在 危机中	450
	危机的信号	450
	反科学的叛逆	459
	物理学的终结	462
>	第二十七章 统一与猜测	468
	关于统一的问题	468
	大统一理论	471
	超弦理论	475
	量子宇宙学	480
>	第四部分 回顾	
>	第二十八章 诺贝尔物理学	487
>	第二十九章 百年物理学回顾	504
	成长与进步	504
	物理学与其他科学	509
	保守的革命	513
>	附录	518
>	进一步阅读	518
	文献目录	527
	人名索引	550

第一部分 从坚实到革命

19 世纪末的物理学：流动 中的世界图像

哲学家与数学家阿尔弗雷德·诺斯·怀特海，曾经把 19 世纪后四分之一时期称为“成功的科学正统时代，没有受到太多非常规思想的干扰……自第一次宗教战争以来思想最为死气沉沉的时期之一”。（Whitehead 1925，148）人们仍然认为，该世纪末的物理学是一项有点单调的事业，它坚实而令人满意地建立在牛顿及其追随者们的决定论的机械世界观之上。那些知名的物理学家们，全然没有准备好应对发生于两个阶段的叛乱：首先，没有预料 X 射线、电子和放射性的发现；其次，真正的革命，发轫于 1900 年普朗克发现作用量子 and 1905 年爱因斯坦的相对性理论。按照这个流行观点，牛顿力学占有至高无上的地位，任何新理论难以匹敌；并且，胜利的一代物理学家也天真地相信：一切值得知道的事物，或许已经知道了，或者，遵循现有物理学的途径而很快就会知道的。伟大的美国实验家阿尔伯特·迈克耳孙，1894 年说：“或许，宏大基础的大多数原理已被坚实地确立；进一步的进展，主要靠将这些原理严格运用于出现于我们细察下的一切现象之中。”（Badash 1972，52）具有讽刺意味的是：仅在一年之后，他就宣布发现了伦琴教授的新射线——那是拒绝用已知的基础原理做出解释的第一个发现。如果跟迈克耳孙之类的观点转变相比较，20 世纪早期的新物理学就显得重要得多了。



当时这些流行的观点部分地是神话，但跟大多数神话一样，它有个事实基础。迈克耳孙不是在那十年间所表达那种观点的唯一物理学家，即：物理学实质上是已完成的，而剩下的事情则是应用物理学、更精确的测量，以及一些相对次要的发现。比如，当普朗克 1875 年进入慕尼黑大学时，一个物理学教授就告诫他：他所选择的学科是多少已完成的，没有什么新东西有望被发现。虽然这种观点在许多物理学家中肯定存在，然而究竟有多广泛却是可质疑的。在 19 世纪 90 年代，似乎有极少数物理学家接受了迈克耳孙的观点转变。在伦琴、亨利·贝克勒、J·J·汤姆孙和居里的惊人发现之后，甚至最保守的实验家也被迫认识到其虚妄。

如果我们说一百年前的物理学是以正统为基础并完全满足于牛顿力学，怎么样呢？难道存在一种机械世界观，或者，存在任何一种公认的世界观吗？完全性问题可讨论，但认为物理学家们顽固地执着于机械世界观，直到 1905 年被爱因斯坦（或 1900 年被普朗克）所纠正，那就是一个荒诞的神话了。最重要的非力学趋势是以电磁理论为基础的，而这只是广泛地心甘情愿挑战机械世界观并探寻新基础的一个标志。这些新基础不是反对就是根本修改机械世界观。按照经典力学的世界图像——牛顿主义的拉普拉斯版本（不要同牛顿本人的观念相混淆）——世界是由原子所组成的，原子是各种长程或短程力的源头并受其作用。这些力跨越空虚的空间超距地作用，万有引力是其范例。随着场论的到来，力的传播机制改变了，但是，麦克斯韦和大多数其他的场物理学家继续为他们的模型寻找一种力学基础。最重要的概念移位是普适以太的凸现，它是一种连续的、穿透一切的、带假设性质的媒质，力以有限速度在其中传播。

1902 年，迈克耳孙在他的光学教科书的最后一部分中，宣布他的信念：“那样的日子似乎不遥远了，许多明显遥远的思想领

域的收敛线将会汇集于……公共的基础上。”他进而说，“于是，原子的本性和它们的化学联合所需要的力，这些原子之间的相互作用（如光和电现象中所显示……）以及原子为其组成单元的分子和分子系统的结构，凝聚、弹性和引力的解释——所有这些将被引导到一个单一的、简洁而一致的科学知识体之中。”（Michelson 1902, 163）这就是八年前提出物理学临近其终点的同一个迈克耳孙吗？是电子和放射性的发现，引起其态度变化？或者，是普朗克以能量量子化观念为基础发现的辐射定律，引起其态度变化？全然不是，在那本书中并没有提及这些新近的发现。迈克耳孙的热情植根于“现代科学的最大概括之一……宇宙中一切现象只是一个渗透一切的物质——以太——的各种运动模式的不同表现。”

麦克斯韦考虑过用其电磁理论来说明引力的可能性，但当认识到那将把巨大的内禀能量推给以太之后就放弃了其努力。其他的物理学家不太容易气馁，在 18 世纪的后四分之一世纪中，有许多试图说明或者校正神圣的牛顿引力定律的努力。有些人试图以电动力学为基础，另一些人则以流体动力学模型为基础。例如，在 19 世纪 70 年代，挪威物理学家卡尔·A·布杰尔尼斯曾研究物体在无限的、不可压缩流体中的运动，导致如下结论：两个震动球产生两者之间随中心距离反比变化的力。他把这视为引力的一种流体动力学解释。布杰尔尼斯的工作被一些英国的理论家们所认可，并于 1898 年被慕尼黑大学的德国人阿瑟·科恩所校正，他发展了引力的一种流体动力学理论。可是，电动力学是当时人们关注的焦点，复杂的布杰尔尼斯和科恩风格的流体动力学模型未能激起人们太多的兴趣。

但是，相对于流体动力学的思考来说，更为重要与宏伟的努力（如果到头来不是更成功的话）是试图仅从以太的种种结构出发就把世界建构起来。最重要的非电磁学理论是涡旋原子理论，



最初于 1867 年由威廉·汤姆孙（后来是开尔文勋爵）提出，继后被整个英国数学物理学家学派所发展。按照这个理论，原子是一种原始的、理想流体（通常等同于以太）的涡旋运动模式。在其获 1882 年阿丹姆斯奖的论文中，年轻的 J·J·汤姆孙对涡旋理论给出了精细的说明，并把它扩展到涵盖种种化学问题，包括亲和与分解。该理论被很有野心地应用于电磁学、引力和光学之中，企图仅只基于以太动力学就建立起一个统一的、连续的“每一事物的理论”。迟至 1895 年，在英国科学进展协会（BAAS）的年会上希克斯作了一个“论涡旋原子的艺术地位”的乐观报告。希克斯关于理论物理学目标的观点值得花点篇幅摘录如下：

一方面，科学考察的目的是发现定律；而另一方面，当它把终极定律减至一或二个时，科学将会达到其最高目标，终极定律的必然性位于我们的认知范围之外。这些终极定律——至少在物理科学领域内——将是物质与数、空间和时间之间关系的动力学定律。终极的资料将是数、空间和时间本身。当这些关系清楚了，一切物理现象就将是纯数学的一个分支。（BAAS Report 1895, 595）

我们将会看到：贯穿 20 世纪，类似的观点始终起着重要作用。虽然许多跟希克斯同时代的人赞同他的哲学，但到了 1895 年，原子的涡旋理论已被大多数物理学家所抛弃。宏伟的涡旋纲领回归为毫无生息的数学了。

另一个流体动力学原子理论，19 世纪 80 ~ 90 年代由数学家卡尔·皮尔逊创立的“以太喷射”理论，也遭到了同样的命运。按照这一理论，终极的原子是以太中的点，新的以太连续地从中喷发，沿一切方向射向空间。跟涡旋理论一样，皮尔逊把他的理

论应用于各色各样的问题，并相信它将能够说明——至少原则上——引力、电磁学和化学现象。虽然皮尔逊理论不如涡旋理论吸引人们那么多的兴趣。这理论之所以值得提及是由于：它不仅包含以太的源，也包含以太的漏（sink），那是一种**负物质**。引力为“负”的物质排斥正常物质，但吸引别的负物质。希克斯于 19 世纪 80 年代在涡旋理论的构架内就讨论过引力负物质，而且，负物质这个奇怪的概念重新出现于皮尔逊的理论当中，以及 19 世纪末物理学的其他讨论之中。例如，英国物理学家阿色·舒斯特就无所顾忌地猜测：可能存在一些完全的反物质星系，它们与我们的星系无区别，只是两者之间会是排斥而不是吸引。他不仅于 1898 年引入了“反物质”与“反原子”的名称，而且，提出物质与反物质的碰撞会彼此湮没，从而预见到后来量子物理学的一个重要概念。

在皮尔逊的反物质版本中，以太在我们世界的一个源点喷出，在其中的一个漏点消失。究竟以太是从何处来的呢？按照皮尔逊 1892 年所著述的，它并非来去无痕，而可能是来自一个它又会返回其中的第四度空间。这里一个通常被视为 20 世纪的一项发明性的概念，出乎意外地在旧物理学中出现了。其实，超空间的概念以及它们在物理学中的可能意义，在 19 世纪 90 年代并不是什么新鲜事。1970 年，英国数学家威廉·金顿·克里弗德就利用弯曲的非欧几里得几何学的黎曼观念提出过，物质和以太的运动实际上是空间曲率变化的一种显示。在 19 世纪末，这种“物理学的几何化”的一般观念是广为人知的，激励着许许多多的物理学家、天文学家和数学家，像 H·G·威尔斯一样的科幻作家就别提了。例如，1888 年，杰出的美国天文学家西蒙·纽堪布于超维空间提出了一个以太模型；1900 年，德国人卡尔·史瓦西在其天文学的工作中大量应用了非欧几里得几何学。虽然这些以及别的一些工作常常是推测性的，而且总是假设性的，但在 19



世纪末，存在一小批研究者考虑以太的超空间模型，或者试图把四维空间同更实在的物理问题联系起来。以 19 世纪 90 年代物理学的特有的精神而论，推测也罢，不推测也罢，这些努力都是合法的。

流体动力学的以太模型不同于物理学中的拉普拉斯纲领，但是，它们仍然以力学为基础，并不试图推翻牛顿的世界观。归根结底，流体动力学是流体的、力学的科学。热力学，作为热和能量的其他显示的科学，对经典世界观构成了大得多的困难问题。这个物理学的分支有时被认为不仅原则上不同于力学，而且，作为一个更为令人满意的、一切物理学均可建于其上的基础，它是优先于力学的。就所涉及的基本问题而言，作为力学的竞争者，电磁学、热力学一道进入了 19 世纪 90 年代。在这个十年里，关于物理学的统一问题有着连续的讨论，可是，究竟哪个学科能够最佳地用作这种统一的基础，是一点也不清楚的，因为所有的物理学家都相信他们自己的理论必定行。

尽管能量守恒定律被成功地用力学的语言描述了，但是，热力学第二定律不肯屈尊于力学原理。例如，力学定律是可逆的，或者说，关于时间是对称的；而热力学第二定律则表达了熵的一种不可逆变化。在其著名的关于熵的统计理论中（1872 年取得进展，1877 年充分发展），路德维希·玻尔兹曼深信，他已经把第二定律归结于分子-力学的原理了。但是，他的解释受到挑战，并成为许多纷争的焦点。他的一个危机是：德国物理学家恩斯特·泽美罗 1896 年从庞加莱的所谓回归定理出发，论证了第二定律不可能从力学推导出来，从而论证该定律跟一个统一的力学世界图景是不相容的。然而，玻尔兹曼拒绝泽美罗论证的有效性，仍坚信力学与热力学之间无深层的不一致性。

按照物理学家乔治·赫尔姆和化学家路德威希·奥斯特瓦尔德（两人都是德国人）的观点，能量是物理科学统一概念中最为

重要的概念，因此，广义的热力学应取代力学而成为物理学的基础。赫尔姆和奥斯特瓦尔德是约在 1890 年得出这个结论的，他们的纲领被称为**唯能论**。在许多方面，唯能论新科学是与力学的世界图景相背离的，因而被认为是反对所谓“科学唯物论”的一个叛逆者。这种反叛包含这样的主张，即：就力学定律将被归结为能量原理而言，力学将被包含于更一般的唯能论的定律之中。唯能论的另一个主张是，它认为原子主义只不过是一个方便有用的表象。奥斯特瓦尔德和包括法国皮尔·杜罕在内的某些别的物理化学家坚持认为：信仰原子与分子是形而上学的，一切经验现象都可以不需原子假设而得到说明。

唯能论纲领被认为足以挑战传统的分子力学观。这一看法在 1895 年在勒贝克举行的德国国家科学家协会年会上作为一个议题提交大会。玻尔兹曼与赫尔姆和奥斯特瓦尔德之间的著名讨论是这次年会的一大亮点，玻尔兹曼攻击唯能论，而赫尔姆和奥斯特瓦尔德则反对机械世界图景。有趣的是，玻尔兹曼及出席会议的其他人，并没有简单地捍卫经典机械世界观，无保留地支持赫尔姆和奥斯特瓦尔德所批评的观点。玻尔兹曼申明“那种认为除了其定律由中心力所确定的质点运动就不存在别的解释的观点，早在奥斯特瓦尔德做出评论很久以前就被人们普遍抛弃了。”（Jungnickel and McCormmach 1986, 222）当然，玻尔兹曼也看不到唯能论纲领的优点，他们偏爱在力学基础上进行工作，觉得从中足以发展出可靠的科学进步来，这一点上，他们全都一样。

在物理学家和化学家中，唯能论只得到有节制的支持；而对于原子理论的批评以及强调能量概念的基本性，也被许多科学家在不直接关系到唯能论纲领情况下一再提及。皮埃尔·居里——或许作为玛丽·居里的丈夫更为人所知——可以作为一个例子。跟他对于科学的实证主义观点相符合，居里避开唯物的与原子的假设，偏爱一种受到热力学定律激励的现象主义。他和另外几个



法国物理学家认为热力学是物理理论的理想。他们坚持认为：能量而不是物质才是那个仅作为过程或作用加以理解的实在的实质。从19世纪80年代早期起，奥地利物理学家、哲学家恩斯特·马赫就为物理学的现象论做辩护。按照他的观点，物理学的理论和概念是组织经验资料的经济手段。马赫承认分子力学的实用性，但既不把它视为一种基础理论，也不把它视为表达物理实在的理论。从一个基本的观点出发，他偏爱能量原理而非力学定律。又跟奥斯特瓦尔德及其盟友相一致，马赫认为原子无非是方便的虚构。此外，马赫批判了力学的核心，如牛顿第二定律所表达的力的观念。1894年亨利希·赫兹在以空间、时间和质量等基本概念为基础重新表述力学时，从实证主义观点出发，对力学基础提出了有点类似的批评。可是，这种对力学的批判性分析，并不必然涉及摒弃机械世界图景的理念。就马赫而言，确实如此，但对于赫兹，力学的这个新版本只是肯定这种世界图景。事实上，赫兹的去力学的一个主要目的是要建立一个电磁以太的力学理论。

在19世纪90年代，机械世界观已不再被视为进步的了，甚至传统者们也不得不承认它并非普适地成功。除了力学和熵定律之间的麻烦关系之外，还有一个更老的、涉及气体运动论的问题。早在1860年，麦克斯韦就注意到：双原子气体定压比热(c_p)和定容比热(c_v)的被测比值，跟基于力学理论的均分定理不一致。按照力学理论， $\gamma = c_p/c_v = 1 + 2/n$ ，其中 n 是分子自由度的数目。问题是：仅当认定气体是刚性的且没有内部结构，双原子气体的预言结果给出匹配的实验（它们给出 $\gamma = 1.4$ ）；这一假设似乎跟分光镜的结果不符，后者强烈地显示分子内部振动跟以太交换能量。这问题被认定为一种反常，当然单一的反常是不足以粉碎机械世界观的。然而，1900年4月，开尔文勋爵在皇家学院著名演说中称“19世纪的乌云覆盖着热和光的动

力学理论”。均分定理的明显失败严重地被视为两朵乌云当中的一朵。另一个威胁是：如迈杰逊和爱德华·莫利的以太漂移实验所展示的，地球在以太中运动的理论遭到挑战（参阅第七章）。

20 世纪早期崛起的新物理学不是反对一个失去活力的牛顿世界观的叛逆，有点类似于伽利略反对亚里士多德主义的叛逆。到 1905 年，力学世界观已经受攻击十多年了；仅此而论，爱因斯坦与牛顿的冲突也绝不是太多的。甚至可以说，比热力学与唯能论所激起的反对更为重要的是：电磁理论中新而有活力的趋势，是 19 世纪 90 年代的特征。我们将在第八章中更详尽地讨论这个所谓的电磁学世界观。在这里我们只强调它的重要性和关键要素。或许，19 世纪后期物理学的基本问题是以太与物质之间的关系。以太是否为物质由之构造的基本基础？或相反，物质是一更基本的本体范畴，以太只是它的一种特例？第一种观点把以太中的结构置于优先位置。在世纪的转折期，当力学以太模型被电动力学模型所取代时，这一观点变得愈来愈为人们所采纳。

如果电磁学比力学更基本，那么，试图从电磁学定律推导力学定律就是有意义的。而这正是许多理论物理学家所梦寐以求的。电磁学被认为是一切科学的一个统一的原理，不像奥斯特瓦尔德的唯能论中能量被赋予的作用。奥斯特瓦尔德及其唯能论盟友者们论述“从属于能量的物质”和“一切事件〔存在〕最终只是能量的一种变化”的方式令人吃惊地相似于电磁学者们的修辞学，只是用“电磁场”取代了“能量”。在两种情形中，唯物主义被摒弃了，物质被宣称为一种副现象。杰出的英国理论家约瑟夫·拉摩基于非物质的超常规的以太毫不费力地想象出一个世界。如他在 1900 年所描述的，他承认这个世界似乎可能“把实在挪到我们的背后”，但他坚持认为，它描述了一个不直接接近于感知的内在实在，以此来捍卫他的以太世界观。（Larmor 1900, vi）这是马赫、奥斯特瓦尔德和其他现象论者所不接受的。在新



世纪之初，一元的电磁学世界观愈来愈被德国、英国、法国和美国先锋物理学家所接受。物理学由物质物理学和电磁以太物理学组成，为了避免不需要的二元论，他们把物质等同于以太，但以太是不能等同于物质的。这不是说就不存在不同的声音了，也不是说这种电磁学教条就渗透到了物理学的整个领域了。在爱因斯坦以前的年代里，既有把以太作为形而上学概念予以摒弃的物理学家，又有继续寻找更理想的以太力学模型的物理学家，甚至有认为以太是通常物质的一种特殊状态的物理学家。这时期的教科书建立在传统力学的基础上，并不反映前沿理论物理学中所讨论的世界观的变化。这就是教科书通常的特点：在其对于现代观念的态度上，它们本性是保守的和谨慎的。

1900年前后，理论物理学的趋势不只是基本概念从力学向热力学和电动力学的一种移位，它也不只是许多惊奇发现的结果。它部分地反映出自物理学之外的许多分支的世界观的一种变化，是由这时期的特殊时代精神所滋养的。这精神有时被标榜为新罗曼蒂克精神。历史学家拉塞尔·麦克科马赫对这种局势做了个恰如其分的概括：“世纪之交的整个文化氛围，隐含于从力学思维到电磁学思维的变化之中。无物质的电磁学概念诱感人之程度，跟力学的惰性物质形象令人厌恶之程度相当。”（McCormach 1970, 495）这种文化氛围的一个重要元素是一种广泛的反唯物论。在不同的科学国度里采取不同的形式，这种反唯物论的教条等于信仰“物质死亡了”。如果物质不是终极的实在，而只是一种非物质以太的某种显示，那么，挑战其他业已确立的教义就似乎不是没有道理了。这些教义是从包括化学元素和物质与能量守恒定律的永恒性在内的物质物理学推导而来的。事实上，在某些地区，在一种强调变换、演化和形成的世界观的视野里，正是永恒性和守恒性被认为是可疑的。

法国心理学家与业余物理学家嘎斯塔夫·列邦可做这方面的

案例。1896 年他报道发现了他称之为“死光”、但可能指 X 射线和阴极射线的东西。虽然列邦所宣称的发现不被看好，但他关于物质、辐射和以太的一般观念却被公众所乐于接受。在某种程度上，这一观念是科学界这一时期时代精神的代表。在其出版 12 次、发行 44 000 册的著作《物质的演化》（*The Evolution of Matter*）中，列邦得出结论：一切物质都是不稳定的，不断地放射辐射或“流出”。物质的性质被认为是物质从无重量的以太状态变换过程中所展示的副现象。按照列邦的观点，在物质与能量之间没有二元论，它们仅代表一个演化过程的不同阶段，这过程的最终结果是纯以太状态。在其关于物质连续地退化为以太的许多论据中，列邦认为放射性是特别有说服力的。他跟许多物理学家都认为放射性是一切物质展示的一种性质。这样一来，一切化学元素放射类以太的辐射终会缓慢地消融掉，这难道不证明了物质的非物质性吗？或者，如列邦相当戏剧性表达的，难道以太不代表“一切事物经多少暂时的存在而变成最终的无忧无虑状态吗”？（LeBon 1905, 315）列邦以及许多跟他同时代的人相信，这就是实际的情况。

许多人不满意实证主义理想，而热望一种非教条的、更有活力的科学，它更好地满足于他们的将其与人类精神捆绑的愿望。这些人对于列邦的准科学推测是相当喜爱的。在一个一直被描述为一种“对于实证主义的反叛”，或者说，一种甚至——但不太正当——“对于理智的反叛”的时期里，他的观念是扣人心弦的。（MacLeod 1982, 3）在那些聆听列邦论据的人们当中，有伟大的亨利·庞加莱。但是，列邦不是一个理论物理学家；他的观点虽然时髦，却不特别严谨全面。如果他不被法国以外的物理学家太认真看待，那可能是由于他未能把电磁以太并入他的推论之中。虽然他的理论涉及世纪之交的一般物理学精神并言之成理，但这种代表性的程度不应被夸张。在各个领军性物理学家的观点中，



存在相当大的差异，而且，还存在重大的国度差异。例如，在德国与法国反对力学世界观，较之英国，更多地联系到实证效力和热力学理想。英国物理学家一般不赞同由皮埃尔·居里、杜罕、奥斯特瓦尔德、马赫和其他人所支持的关于科学的实证的、侧重事实面的观点。在1896年一篇对奥斯特瓦尔德的批判性评论中，爱尔兰物理学家乔治·菲兹杰拉德区别了形而上学可接受的英国风格和演绎的、非哲学的德国风格。他写道：“英国人需要情感，某种唤起热情的东西，某种关切人类的東西。”（Wynne 1979, 171）法国的新罗曼蒂克者们重复地为“关切人类”的情感、行动和演化过程而呐喊，他们把他们的风格同那些被认为是古板的德国风格加以对照。与此同时，他们反对英国的物理学风格，发现英国人过于力学化而缺乏精神光华。

第二章 | 物理学的世界

人才与资源

20 世纪 90 年代的物理学家群体是些什么人？共有多少人？是哪国人？在什么学院工作？他们从事何种工作？他们是怎样崭露头角的？让我们先来看看物理学家的人数——他们是直接推动物理学进步的专业研究者，或间接推动物理学进步的教师。关于世纪之交物理学家的社会背景尚不明晰，但一份德国物理学家的调查资料表明，德国青年物理学家一般来自社会中等和较高的上等阶层。他们——而且总是男性——与年轻的人类学者无社会背景差异。而化学家——尤其是有机化学家——更多地来自于商业社区（表 2.1）。或许，这种差异反映了化学与工业之间的密切联系；相对于物理学，这种联系尚未形成明显趋势。

虽然“物理学家”一词的含义是随时代而变化的，但到 1900 年时，它的含义已与今天的意义并无重大差别；当时的物理学已经达到了一种不像其在 1810 年而更像其在 1990 年的专业水平。绝大多数物理学家——就是那些物理研究文献的贡献者——是专业人才，他们从事大学或专科学院（如德国的高等技术学校）物理研究所的工作并以此为生。有天赋的业余者，比如高中教师和



表 2.1

德国博士科学家的社会背景

领域	年	博士人数	中等和高等 阶层 (%)	商业社区 (%)	农业 (%)
物理学	1899	56	52	36	9
	1913	68	53	40	7
数学与天文学	1899	19	53	39	16
	1913	8	50	50	0
有机化学	1899	99	25	66	8
	1913	99	33	57	10
无机化学	1899	77	29	61	10
	1913	42	40	45	14
人类学	1899	64	50	44	6
	1913	441	50	38	4

注：1899 年的数据是 1896 ~ 1902 年的平均。摘自 Pyenson 的资料。

富足的个人也起一定的作用，不过，他们人数很少而且处于持续递减中。许多工程师和技术专家从事应用物理学的工作（例如，工业与医学），也有理由纳入物理学家之列。然而，物理学家的主流仍然是那些明显致力物理学而占据教席的、所谓的学院物理学家们。跟一般科学一样，尽管有日本的崛起，排外几乎是一种欧-美现象，物理学也概莫能外。物理工作是在英国、德国、荷兰及其殖民地（大多数由白人）做出的。

从表 2.2 可以看出，首先，1900 年的物理学是一个很小的世界。全世界的学院物理学家总数大约在 1200 ~ 1500 之间（相比之下，英国、德国、法国的国家化学学会的成员已达 3500 以上）。此外，这个小世界几乎是极少数几个国家的天下，英国、法国、德国和美国是其中最重要的国家；他们的物理学家总数约

表 2.2 1900 年前后的学术物理学

研究院及 附属机构	物理学家 人数	密度 (每百万)	总消费 (千马克)	平均每人消 费(千马克)	总产出率 (每年)	每名物理 学家产出率
奥地利- 匈牙利	64	1.5	560	8.8		
比利时	15	23	150	10		
英国	114	2.9	1650	14.5	290	2.2
法国	105	2.8	1105	10.5	260	2.5
德国	145	2.9	1490	10.3	460	3.2
意大利	63	1.8	520	8.3	90	1.4
日本	8	0.2				
荷兰	21	4.1	205	8.9	55	2.6
俄罗斯	35	0.3	300	8.5		
斯堪的 纳维亚	29	2.3	245	8.5		
瑞士	27	8.1	220	8.2		
美国	215	2.8	2990	14.0	240	1.1

注：1900 年 1000 马克的等值约 240 美元。摘自 Forman, Heilbron 和 Weart 1975 的资料。

为 600 人，几乎占全世界物理学家总数的一半。其次是意大利、俄罗斯和奥地利-匈牙利；然后是第三群体，包括比利时、荷兰、瑞士和斯堪的纳维亚的国家。在 1900 年，美国的物理学家人数已经引人注目，比任何别的国家都多；在“大四国”中，物理学家的密度是相等的（约每百万人中 2.9 人），颇低于瑞士和荷兰的比例。虽在人数上美国居第一位；但就产出率和原创性而言，



它远远落在欧洲四强之后。这部分原因是由于在大部分美国大学里，仍存在一种与德国研究理想以及作为大学教师生涯实质要素的奖学金不相称——事实上常常敌视——的氛围。1989年，麻省理工学院（MIT）的校长宣布：“我们的目的应该是：学生的心灵，而不是科学的发现，不是专业的成就”——一种不容易引导大量科学研究观点。（Kevles 1987, 34）

十多年后，20世纪刚过，亨利·罗兰面向刚成立的美国物理学会发表了一个演说。他坚定地为纯科学辩护，认同作为文化与自由研究的德国理想。罗兰告诉他的听众：“我们形成一个小而唯一的群体，一个新变异的人种。”这新的群体是“智力贵族和理想贵族”，不是“财富贵族和血统贵族”。罗兰清楚地知道他的观点不被他的许多同胞认同。他哀痛“这个国家的大量智力仍然浪费在追逐服务于我们物质需要的所谓实践科学；而更宏大的基础科学仅乞求于我们智力的主体部分，只给予少量的思想和金钱”。（Rowland 1902, 668）在罗兰发表演说的时候，事态急速地发展着，美国物理学家处于成为世界物理学主流部分的前期。1893年《物理评论》第一期问世；1899年，美国物理学会建立；两年后，国会授权25万美元建造国家标准局。同年，安德里·卡尼奇捐助1000万美元建造一个研究所以鼓励基础研究。建成的卡尼奇研究所对各大学的研究产成了一种激励效应。

美国物理学会的成员标志着美国物理学专业的成长。1899年成员不到100人；10年后成员增加到495人；到1914年已超过700人；在接下来的10年里，增长率甚至更高（见图2.1）。到1910年，美国物理学已经走出了欧洲的阴影，尽管这个国家在理论物理学中仍然很弱。在《物理评论》上发表的大多数论文的质量不能跟《物理年鉴》和《哲学杂志》上的论文相媲美。

尽管有诸如罗伯特·伍德、阿尔伯特·迈克耳孙、罗伯特·密立根和吉尔伯特·列维斯等杰出的物理学家，美国物理学家仍

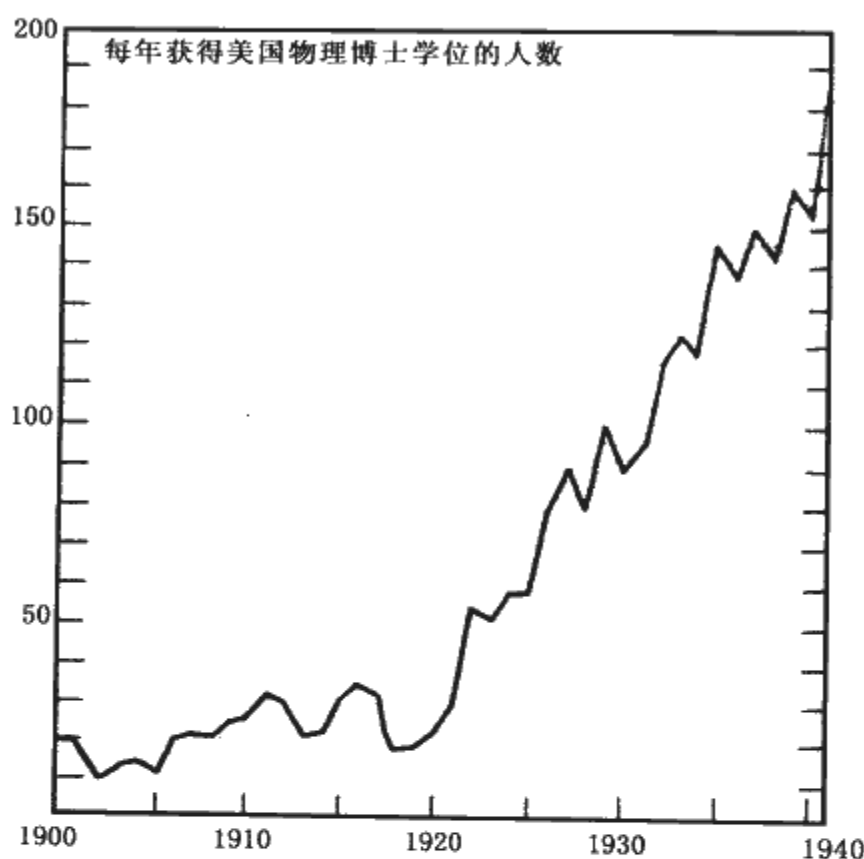


图 2.1 1900 ~ 1940 年间获物理学博士的人数，显示美国物理学的崛起
来源：Weart 1979a, 296; N. Reingold, ed. *The Sciences in the American Context: New Perspectives*. Smithsonian Institution Press, copyright 1979. Used by permission of the publisher

然是相对地方性的，理论工作仍依赖于欧洲所发生的事态。1905 年路德维希·玻尔兹曼访问了贝克莱的加利福尼亚大学。他发现自然是美丽的，女士们是健壮的；但他对当地理论物理的当时水准没有什么印象，如他在一篇首次发表于 1905 年《一个德国教授在黄金国的旅游》通俗文章中所说的：“是的，美国取得了巨大成就，我相信这些人们，甚至在看到他们在并不是最好的场所



工作，使一个理论物理研究班完善而有特色之后……”（Borltzman 1992, 52）

物理学一直总是国际性的。在 19 世纪，不同国度物理学家的交往包括会议与合作，是频繁的。可是有组织的较大范围的学术大会却很稀罕，直到 1900 年夏在巴黎召开了第一届国际物理学大会。同一时间并在同一城市，两百名数学家参加了第二届国际数学大会。物理大会是由法国物理学会结合该年在巴黎举办的世界展览会组织的。大会的三卷论文集收录了来自 15 个国家的物理学家的 70 篇科学评论论文。不奇怪，论文大多数（36 篇）是法国的。接下来是 10 篇德国论文和 6 篇英国论文；第四科学大国美国只有 2 篇。出席大会的物理学家还有荷兰（4 篇）、俄罗斯（4 篇）、意大利（3 篇）、奥地利-匈牙利（3 篇）、丹麦（2 篇）、挪威（2 篇）、瑞典（2 篇）、比利时（2 篇）和瑞士（2 篇）；非白人发表的论文是由一名日本人和一名印度人提供的。当然，法国代表在巴黎大会上的强大阵容，不应视为其在世界物理学中的相应强大地位——事实上，法国物理学尤其是理论物理学在当时是衰落的，不再能跟德国和英国的物理学相竞争。在巴黎大会上设计的主题涵盖一个广大的领域，但未覆盖整个当代物理学。表 2.3 示出应邀论文的主题，有关于计量学、弹性、临界现象、固体与液体的力学和热学性质、光压、赫兹波、磁-光学、大气电学、太阳物理学、生物物理学和引力的一些讲座。没有忘记新近的一些发现：亨利·贝克勒尔和居里关于放射性的讲座、威廉·维恩和奥托·鲁梅关于黑体辐射的发现（分别从理论上和实验上）、保尔·卫兰德关于阴极射线的发现和 J·J·汤姆孙关于电子理论和原子构造的发现。汤姆孙和大多数与会者都不满意卫兰德关于阴极射线的讨论。在汤姆孙关于阴极射线是自由电子的著名认定之后，法国物理学家还力挺阴极射线不是由电子而是由氢离子所组成。

表 2.3 在 1900 年巴黎大会上应邀论文主题的分布

主 题	数目	百分比
电学和磁学	22	24
力学与分子物理	19	20
一般问题, 测量与单位	15	16
光学与热力学	14	15
宇宙物理学	9	10
磁-光学, 阴极射线, 铀射线	8	9
生物物理学	5	6

与后来的标准相比, 物理学是一项花费少得可笑的活动, 但从科学基金的当代标准来看, 显得不一样。19 世纪 90 年代和 20 世纪初创立了许多新的实验室 (见表 2.4), 增加了工资和设备的花费。1890~1914 年, 许多新的物理实验室被创立: 德国 22 个、英国 19 个、美国 13 个、法国 12 个。虽然德国建立了许多最大的研究所, 但英国和美国的投资要大得多。当德国每年给每位物理学家投资 10 300 马克时, 美国的投资等值比是 14 000 马克, 英国是 15 500 马克。当然, 这些数字是平均值, 实验人员的花费比理论人员大得多, 所以, 在不同物理学家和不同学院之间, 对个人的投资会有很大的差异。例如, 柏林大学物理研究所 1909 年拥有 26 174 马克资金, 而小小的普朗克的理论物理研究所只有 700 马克的预算。

物理设备的提升产生了一种显著变化, 那就是研究工作面向高等教育, 并作为它的首要功能。这在德国是有根基的, 只在 1900 年才被其他国家充分接受。在当时, 研究生成了任何一个重要的物理研究所的中心角色, 而且, 随着研究生的涌入, 需求更多的实验室空间。



表 2.4

物理研究所和设备

	研究所数目	设备, 1900	设备, 1910
奥地利-匈牙利	18	48	59
比利时	4	9	10
联合王国	25	87	106
不列颠帝国, 其他	7	10	13
法国	19	54	58
德国	30	103	139
意大利	16	43	51
日本	2	6	17
荷兰	4	10	13
斯堪地纳维亚	7	18	26
瑞士	8	17	23
美国	21	100	169

莱布尼兹大学的资料揭示：当物理研究所于 1835 年建立时，其面积的 12% 计划用于实验室；1873 年研究所扩建四分之一，实验室增至 46%；另一次扩建在 1904 年，面积增加三分之一，实验室和研究生用地达 60%。因此，在 70 年的时间里，研究空间约增加 60 倍。部分研究生的研究工作要追溯到 1830 年吉森的久斯塔斯·李比希化学实验室，在 19 世纪 70 年代和 80 年代，这种研究工作在许多德国大学物理学中成为研究所化了。图宾根大学的物理研究所建立于 19 世纪 80 年代后期，而在当时“不指望研究所的研究生实行独立的科学考察现象”，如弗里德利希·帕森于 1906 年的报告中所说，“在过去的十年里，这方面的情况已根本改变。”（Forman, Heilbron and Weart 1975, 103）

1890 年以前，在美国和许多其他国家中，甚至不指望教授们

会进行独立的科学考察。哈佛大学杰斐逊物理实验室于 1884 年建成，安置许多实验室和一个大的报告厅是为了供教学与研究用。约翰·特罗布里奇自 1888 ~ 1910 年任该室主任，他清楚地领悟到，那是效法德国的物理学传统的全盛时期。1884 年，他针对“不被实验室工作支持的讲座和死记呆背系统”仍然普遍的现象发出警告，并倡议开设适合新的实验室的实验课程。12 年后，他可以回头看到一个在教学与研究两方面均发生变化的时期：“今天可以指望〔哈佛物理教授〕一定量的原创工作。在过去的十年里，哈佛大学所做的原创研究比原先两百年的还多。”（Aronovitch 1989, 95 and 99）

物理期刊

那么，什么是物理学的投资产出率呢？与其他科学家一样，物理学家生产论文；研究论文的数目是科学生产率最直接的量度。到 1900 年的时候，物理期刊以大体跟今天一样的格式存在，当然，当时的数目极少，专业程度极低。虽然物理研究的最大和最实质部分在专门的物理期刊上发表，不过在覆盖其他科学学科的期刊或年鉴上发表的文章也不少。例如，巴黎科学院出版的《报道》；哥廷根科学协会出版的《哥廷根新闻报道》，以及《美国科学进步联合会的进展》。许多国家均有致力于物理学的、通常使用地方语言的地方期刊，它们常常由地方物理学会出版。但是，有国际影响的研究论文很少出现在较小国家的期刊上。这些论文一般发表在大的西方国家的核心物理学期刊上，它们是：《物理学杂志》（英国）、《物理学纪事》（德国）、《新实验》（意大利）和《物理评论》（美国）。表 2.5 给出 1900 年物理论文的数目，并表明：在论文的产出和物理学的产出率两个方面，德国均明显领先于其他国家。



表 2.5

1900 年的物理期刊

国家	核心物理期刊	论文数, 1900	百分比	产出率
英国	哲学杂志	420	19	2.2
法国	物理期刊	360	18	2.5
德国	物理年鉴	580	29	3.2
意大利	新实验	120	6	1.4
美国	物理评论	240	12	1.1
所有其他国家	—	280	14	—

注：表中最后一列“产出率”为每位学院科学家的平均论文数。

德国在物理学中的强大地位，在量和质两方面都是毋庸置疑的。说到质的方面，或如后来科学史学家判定为对物理学做出重要贡献的方面，权威的《科学传记字典》列出了 197 名 1900 年 20 岁以上的物理学家，其中，52 名是德国人，6 名是奥地利人，35 名是英国人，34 名是法国人，27 名是美国人，9 名是俄罗斯人，荷兰和意大利各有 7 名，5 名是瑞典人。这个清单跟按别的一些方面列出的评价是极为相似的。就重要程度而言，高质量的物理研究集中于世界四个经济与政治领导国。这些国家拥有这一时期的 75% 的有重大历史意义的物理学家。如果把奥地利-匈牙利、荷兰和斯堪的纳维亚也划入一个德国集团之内，那么，大四国的数值就是 86%，德国集团的数值就是 38%。诺贝尔奖的资料大致说出相同的话。从 1901 ~ 1914 年间的 20 名诺贝尔奖获得者中，16 名来自大四国（但只有 1 名美国人），而且，提名为候选者的 77% 来自大四国。

在 20 世纪的头十年里，领军物理期刊是《物理学纪事》，虽然，它在英语国家中受到《哲学杂志》的挑战。《物理学纪事》要追溯到 1799 年，当时的刊名是《物理与化学纪事》，但当保

尔·德鲁德于1900年取得主编权之后就把“化学”删掉了——已经有足够数量的化学与物理化学方面的期刊，而且，很早以前《物理与化学纪事》就已集中于纯物理学了。1906年德鲁德死后，威廉·维恩成为主编，普朗克继续当副主编并负责理论物理学。由于《物理学纪事》是一个德语期刊，自然绝大多数投稿者是德国人，但也有许多稿件来自奥地利、斯堪的纳维亚和荷兰的物理学家。《物理学纪事》是当时有威望的、为纯研究服务的期刊，而且，它的几乎全部论文都是由大学物理学家，或者主要物理实验室（诸如柏林帝国物理与技术研究所）的物理学家撰写的。不过，跟它轻易成为权威一样，在《物理学纪事》上发表论文也不是特别的困难。期刊包含有大量模糊的和无意义的文章，常常是仅实验的、稍加删略的博士论文。跟后来的出版实践形成鲜明的对照，按照普朗克的估计，1905年的退稿率只是提交论文的5%~10%。物理学的成长反映在《物理学纪事》的逐渐扩展上。年期刊数由1900年的12期增加到1912年的16期。此外，由于发表已完成研究的论文常常是很长的，固有《纪事摘要》按集出版。大家知道，物理文献和一般的科学文献的特征模式是按指数增长的。可是，有许多理由使人相信，关于指数生长律的大多数讨论，仅对于1920年以后的科学才有效。就物理学而论，在1900~1910年间在主要摘要期刊中被评论的论文数大体是恒定的。1900年2468篇被评论的论文在《纪事摘要》中占1358页；10年后，期刊收录2984篇论文占去1312页。同样地，在此期间出现在《物理进展》上的论文的数目在1872篇与2825篇之间涨落。没有系统增长的迹象，不论是指数增长或其他的增长方式。

在这个世纪的头十年里，《物理学纪事》更多地面向普朗克所激励的理论物理。它刊载关于电子理论、相对论、量子理论、热力学和引力理论方面的文章。在20年里，该期刊成为理论物



理新趋势中的旗舰。这一趋势也反映在创刊于 1899 年的专门发表较小文章的双周刊《物理杂志》上。可是，《物理杂志》期刊并不具有《物理学纪事》那样的质量，常常被那些手稿被普朗克与维恩所拒绝的作者利用。还有另一份创办于 1904 年的约翰尼斯·斯塔克任主编的新的德国物理期刊《放射性电子学年鉴》。如刊名所示，该刊专门面向 19 世纪 90 年代新发现的物理学的，特别是放射性、射线和电子物理学等新发现。（当时的电子学意指关于电子的物理学，尚无后来电子工程的意义。）斯塔克的《物理学纪事》几乎纯粹涉及实验主题，并不包括关于电子的电磁学理论，或其在电子学定义中的类似主题。

如果物理学有一个领域或技术表征了整个学科的话，那么，或许分光镜是一个良好的候选者。在许多方面，分光镜在理论和实验上都是物理学的前沿领域。分光镜方面的论文，列在光谱和塞曼效应名下，占 1898 年《科学文摘》全部论文的 3.2%；1908 年该比例上升到 6.2%。德国分光镜专家汉利希·凯瑟吹牛说，他拥有其研究领域的全部论文。1938 年这位 85 岁高龄的物理学家发表了一个关于分光镜发展的统计研究（表 2.6）。这份资料不

表 2.6 1890 ~ 1910 年间分光镜方面的发表文章

	1890	1895	1900	1905	1910
德国	81	105	167	144	171
英国	52	60	62	73	69
法国	32	41	42	74	53
美国	31	37	44	70	67
意大利	5	11	11	13	11
其他	17	33	39	42	41
合计	218	287	365	416	412

来源：Kayser 1938

仅显示了关于分光镜发展的大致轮廓，而且粗略指示出物理学在1890~1910年间在不同国度的分布。

一个日本人眼中的欧洲物理学

1870年以前，日本实际上不存在物理学；甚至到世纪之交时，日本的科学研究所还极少，设备也很差。1877年创办了东京大学教授物理学，但研究工作在大学的地位很低。“大学预算没有为研究预备经费，”一位物理学家关于新世纪之初的条件回忆说，“在那些日子里，东京大学的理学院中给物理学的操作预算是5 000日圆 [约2 500美元]，化学是4 000日圆。这不足以支付教授学生所需的仪器、化学药品、书籍、期刊、样本、木炭、用气和用电，研究费用真少得可怜。”（Nakayama, Swain, and Yagi 1974, 166）

长岗半太郎——在第四章中将对他作进一步讨论——是日本物理学先锋之一。他于1887年毕业于新东京大学，自1893~1896年他去欧洲作一个扩展的研究巡游，在慕尼黑、柏林、维也纳等大学连续做他的研究。1910年7月，作为当时东京帝国大学（即改名后的东京大学）一名教授和日本杰出的物理学家，他再次赴欧洲作一次扩展的研究巡游。他出席了许多学术大会，访问了几个最杰出的物理研究所，造访了许多物理学的精英（已故或在世的），并且同重要的物理学家建立了联系。长岗在其研究巡游中所看到的，以及在其信件中所报道的，是当时第一流欧洲物理学家之所为的一个颇具代表性的写照——在很大程度上来说，当时的物理学仍然等同于欧洲物理学。作为一位在物理学的实验和理论方面都活跃的研究者（以及在法国、德国和英国的竞争者），长岗有资格对欧洲物理学的状况给出一个可信赖的报告，而且，这或许比由欧洲人自己给出的报告更客观。



在1910年给意大利物理学家奥古斯托·里奇（从事电学与光学实验的实验家）的一封信中，长岗谈及他从波罗格那（他在那里曾同里奇住在一起）到罗马，再从罗马到日内瓦、苏黎世、慕尼黑和柏林的印象：

在苏黎世魏斯教授的实验室里进行着许多有趣的磁学研究，在那里我看到了磁铁产生80 000高斯以上的磁场。在慕尼黑，埃贝特从事有关大气电的工作，而且，有几项有趣的考察正被伦琴实验室和索末菲尔德领导的理论物理研究所实施着。慕尼黑高等技术学院也有一个技术物理研究所，在那里焦耳-开尔文效应是通过多孔塞流出的气体进行考察的，同时，相关于在蒸汽涡轮机上的应用意义，已经考察了高温高压下蒸汽的比热容。跟通常物理实验室的唯一区别在于：利用了高功率的机器，以及力学工程师同物理学家的合作。

在同一封信中，长岗对欧洲物理学家对于他在1904年的原子理论（见第四章）缺乏兴趣感到遗憾。他把这一忽视归因于作为原子理论权威的J·J·汤姆孙占据主导地位所致。“对我来说，杰出英国物理学家的冗长名字似乎重得足以压抑一个东方物理学家的的工作，”他抱怨。长岗总是尖锐地意识到自己是一名在白人主宰的领域内的东方人，他努力奋斗以证明日本科学并不必然劣于西方人。在1888年的一封信中，他写道：“白人将在每个方面如此至上是没有道理的，而且……我希望我们将在未来的10~20年的过程里击败那些自大的人们。”（Koizumi 1975, 87）对于新一代日本科学家来说，科学的竞争是不可能完全跟人种的竞争分开的。

忙碌的日本旅游者也访问了曼彻斯特的欧纳斯特·卢瑟福、

莱顿的 H·凯末林·昂尼斯、阿姆斯特丹的皮特·塞曼和日内瓦的 É·塞拉逊；并且，在德国除了慕尼黑与柏林，他还访问了波恩、斯特拉斯堡、阿杰恩、海德堡、维尔兹堡、卡尔斯鲁赫、莱比锡、哥廷根和布拉斯劳的许多大学或技术学院。他向卢瑟福报告了许多研究所的细节。凯末林·昂尼斯的低温实验室给他留下深刻印象；他思索着，在那可得到的仅高于绝对零度几度的条件下，放射性衰变是否仍不受影响。在阿姆斯特丹，长岗看到了塞曼考察着以其名字冠名的效应。在莱顿他聆听了亨利克·洛伦兹“讨论〔费利克斯〕埃伦哈夫特的对于电子电荷的奇特结果”，即所谓的亚-电子的存在；访问柏林的研究所时，“〔埃里奇〕瑞吉纳重复了埃伦哈夫特的实验，并宣布该结果是完全错的。”从长岗的报告可明显地看出：长岗把德国看作是物理学的领头国家。他把海德堡大学的菲力普·勒纳德的放射线研究所描述为“或许是德国最有活力的一个”，并且说“勒纳德教授及其大多数学生正从事光转移和光电作用的研究”。在哥廷根的活动，他挑出了埃米尔·维彻特的地震学研究和沃尔德马·沃伊特实验室。该研究室“正在庆祝相关于晶体物理学、磁光学和电光学的多项工作，那里有 20 多名研究生”。“该物理研究所或许是德国最大的研究所。但我发现最大不总是最好的。不论研究所如何贫困，如果它有真挚的研究人员和一个有能力的头儿，它就会繁荣。实验室的大小和设备，在我看来，在科学研究中是第二位的。”（Badach 1967, 60）

长岗的说明局限于经典物理学。他并未涉及量子理论，相对论只是一带而过——“在慕尼黑……也有一个由从事相对论原理的索末菲领导理论物理研究所。”这并不是由于长岗是一个保守的物理学家，而是他没有发现在这世纪的头十年估计会发生的革命。在当时，经典物理学处于完全主宰地位，而且，处于一种健康的、进步的状态之中；而关于量子理论和相对论的新理论，



当时仅由物理学共同体中极少量的人开垦着，在物理学的一般视野中是难于看到的。如果一场革命在暗中进行，那么，只有很少的人才觉察到它。对于取自主导地位的文摘期刊的物理专家分布的分析，可证实这一印象。例如，收录在《物理学纪事文摘》1910年卷中2 984篇论文（见表2.7）表明：几乎有一半是光学（16%）、电学和磁学（31%）方面的。如果你以为表中“宇宙物理学”可能引导人们想到现代意义的天文物理学或物理宇宙学，那会是弄错了时代。天文物理学和宇宙学的主题并没有出现在该范畴之中，而天文分光镜、地球地理学、气象学、大气电学和地磁学却在这范畴中。在柏林物理学会的文摘期刊《物理进展》中，“宇宙物理学”是1890年引入的，同时引入的有“地球物理学”（“天文物理学”是一个更老的词汇，第一次出现于1873年）。宇宙物理学是试图把这些和另一些现象并入物理学之中形成一种跨学科。当瑞士物理

表 2.7 文摘 1910 年卷中主题的分布

主 题	数 目	百分比
电学与磁学	913	31
光学	488	16
物质的组成与结构	351	12
宇宙物理学	321	11
热学	293	10
力学	264	9
放射性	182	6
测量与重量	60	2
一般	59	2
声学	27	1
历史与传记	26	1

化学家斯范特·阿亨尼尔斯撰写其有影响的《宇宙物理教程》(1903年)时,它是世纪之交期间物理学的一个通俗分支。可是,十年后宇宙物理学已被放逐到物理学的边沿了。

由《纪事文摘》给出的关于物理学主题的一般组成,得到《美国科学文摘》的确认。它列出了1910年物理学1810篇论文。两者的差别主要是主题分类方法不同。例如,在《纪事文摘》中列于“物质成分与结构”类项物理化学的论文,在《科学文摘》中列入意义更窄狭的类项和一个附加的“化学物理”的特别列。这里的化学物理不同于现代的化学物理,后者是1930年以后引入的一个二级学科。每一个主要类项又有许多子条目。范畴“物质成分与结构”的组成,清楚地表明其内容不是原子和分子物理学,不如说是理论化学。它的子条目是:一般;质量,密度;原子重量;分子重量;[化学]元素;化合物;反应;亲和力;平衡;溶解;吸引;吸收;吸附;胶质;固体溶解;合金;晶体和液晶。

在文摘期刊中没有太多论及原子物理学的论文,人们找不到诸如“原子结构”、“量子理论”、“相对论”或相关名称的条目。当然,处理这些主题的论文是有的,但它们是隐藏在其他条目之中的,而且数目极少。例如,论相对论的论文主要被包含在“一般”类的标签下;而那些处理量子理论的论文则出现在“热”和“光”的标签下。对于两个文摘期刊的考察导致这样的估计:1910年相对论的论文不到40篇,量子理论的论文则更少。“新物理学”是一个方兴未艾的活动,但这不会太长了。关于经典和实验物理学的主宰性印象,可进一步被意大利《新实验》的一个统计所确认。1900~1904年间经典物理学(定义为力学、光学、声学、热力学和电磁学)以及应用物理学,分别占出版物的33%和22%;10年后,这比例是32%和17%。大多数出版物是关于实验的,即:1900~1904年间占86%,1910~1914年间占77%。相对论与量子理论的论文极少,1910~1914年间不到10篇。

第三章 | 气体放电及后续事态

物理学的魅力之一就是它跟自然打交道，而自然是遮遮掩掩的。有的自然现象或在实验室中可产生的现象（虽然也是自然的），是物理学家在给定时期内不知其然的。有时，新现象的发现是我们世界观的重要推论。19 世纪 90 年代的物理学家相信：物理学的基础是一劳永逸地被确定的，这一结论隐含地认定一切重要的自然现象都已经知道了。而 1895 ~ 1900 年之间的一系列发现把他们戏剧般置于一片惊讶之中。

人们从第一章可能获得这样的印象：19 世纪 90 年代的大多数物理学家，充分关注各种关于物理学基础的深层理论问题。实际情况远不是这样的。这一时期的物理学家绝大多数是实验家，比方说，他们考察电测量的方法，考察热现象，考察分光镜以及气体中放电。虽然第一个关于真空玻璃管中的放电实验，早在 18 世纪后期就做出来了，但直到 19 世纪 50 年代这个领域才引起严重的关注，主要是由于瑞士人奥古斯特·德·赖夫和德国人久利阿斯·普吕克开创性的工作。普吕克的一名学生约翰·威廉·赫尔姆系统地考察了管中出现的光，并把它等同于从阴极发出、在无场的空间沿直线运动的射线；就是说，等同于阴极射线，这名字是 1876 年由柏林物理学家尤根·哥尔德斯坦首次引入的。在那时这主题已经成为物理学的一个重要部分；通过英国威廉·克

鲁克斯实施的实验，它受到额外的注意。1879年克鲁克斯假设阴极射线是颗粒的——一股荷电的分子流或他所谓的“物质第四态”。年轻的亨利希·赫兹是觉得新领域提供了诱人挑战的人们当中的一个，主要是由于它似乎提供了一个认识的快捷途径，也由于放电现象看起来是神秘的、简直是诱惑人的。1882年在关于其早期实验的描述中，他写道：“在其中部，整个玻璃管是发光的，在放电的影响下气体在其中作疯狂的不可思议表演，并产生强大、多变、绚丽的现象。现在我的空间实际上就像女妖的厨房。”（Buchwald 1994, 132）赫兹和其他阴极射线研究者的女妖厨房中的仪器包括：一系列特殊设计；装有电极的真空管，一个鲁姆科夫感应线圈，以产生必要的高电压；当然还有最重要的真空泵。

如回顾所见，阴极射线的本质问题是这一研究领域最重要的问题。可是，开初它不被认为具有关键意义。许多物理学家当时考虑的是放电现象的其他方面，诸如各段色光及其在磁场作用下的行为。19世纪90年代有些物理学家相信他们识别了一种新的阴极射线，有时称作“磁射线”，但这种发现宣称并未被公众接受。当射线横过平行板电容器的电场时，赫兹未能使其偏转。这使他得出结论：射线是电中性的，不是放电的一种原初效果。按照这一观点，一个电流在管内流过，但被观察到的阴极射线是不同于产生这些射线的电流的，这些射线是某种流动或以太中的波。赫兹的结论跟克鲁克斯和其他英国研究者的粒子假设相违背，但受到大多数德国物理学家的支持。1894年赫兹的学生菲力普·勒纳德把一片薄金属箔作为一扇窗放入管内，证明阴极射线能够穿过金属箔。这些实验是对赫兹观点的巨大支持。如果射线是原子或分子束，这种穿透是无法解释的。由于实验证据跟各方观点不一致，争论的分野十分模糊，整个领域呈现一片混乱。例如，就在勒纳德用实验支持他提出的以太-脉动假说的同一年，



英国的 J·J·汤姆孙争辩阴极射线的速度只有光速的千分之一；如果射线是以太中的电磁过程，那么它的速度会指望非常接近光的速度。勒纳德的实验以及阴极射线研究的不确定状态使许多德国物理学家从事这一主题。其中之一就是威廉·康拉德·伦琴，维尔兹堡大学一位相对不出众的教授。

一种新的射线

1895 年夏，伦琴受勒纳德的激励着手考察阴极射线的穿透力。像其他做射线实验的物理学家一样，他使用了一个氟化钡-铂的屏以探测由阴极射线发出的荧光。在特定的实验中原以为这屏是不起作用的，所以把它摆在离管子一定的距离处，用黑纸板遮盖，并在暗室中操作。1895 年 11 月 8 日，出乎伦琴意料，他惊异地观察到这屏发出荧光，这是一个不可能被阴极射线引起的现象。确认这现象实实在在之后，他很快就把它认作是一种跟光和阴极射线都不同的新射线，并开始对它做系统的考察。用伦琴自己的话来说（摘自 1896 年 1 月他的原始通讯），他的观察是：“让来自一个大鲁姆科夫线圈的放电，通过一个希托夫 [真空管] 或者一个足够旧的勒纳德、克鲁克斯或类似的仪器，并用一个薄黑纸板做成的、多少密闭的罩把管子罩住。在完全黑暗的房子，我们看到一个涂有氟化钡-铂的纸屏被照得通明，不论转向放电管的这一边还是那一边，荧光都一样好。”（Segré 1980, 22）11 月 8 日是 X 射线的正式生日，但当然，宣布伦琴只是在这天傍晚偶然发现这一射线，那就太天真了。他渐渐意识到：一种令人惊奇的现象，并把原先的观察变成一种发现，是需要艰辛的工作和大量的思考的。直至这年年末，伦琴才肯定他的确发现了一种新射线，然后才宣布他的发现。把它叫做该年的发现，或甚至十年的发现，都不为过。与较晚辈的物理学家们的实践相反，伦

琴不开新闻发布会。事实上，他独自工作，将他的发现作为一个秘密保护，直到它在出版物中出现。

伦琴的发现引起轩然大波，特别在物理学家和医生当中，而且，在广大民众中亦反映强烈。在物理学同仁中头号问题涉及新射线的本质，它甚至比阴极射线更难归类和理解。在其初步的考察中，伦琴发现新射线具有光的某些性质，即：它们走直线，影响底片，并且不受磁场影响；但是，它们似乎不同于光和赫兹的电磁波，不显示反射和折射。他权宜地提议射线可能是以太的纵振动，这观念一时受到几个物理学家的支持。可是，不论这个还是其他的观念，包括关于 X 射线是一种极端的紫外辐射的建议，都没有获得普遍的承认。在十多年里，物理学家在不知道他们同什么打交道的情况下兴奋地折腾 X 射线。这种缺乏理解并没有阻止新射线的经验知识的增长，也没有阻止把射线作为工具用于实验物理学。例如，很快就认识到 X 射线管是电离气体的理想，并且，由于这种能力，新的管子被广泛地用于各种实验之中。

关于 X 射线本质的讨论持续进行着，直到证据积累到人们认识到：它们是一种特殊的电磁（横）波，可能具有极长的波长。当 1905 年英国物理学家查尔斯·巴克拉用散射实验论证射线显示激化时，这种信念得到了增强。然而，问题远没有解决。另一些实验似乎反对波假说，比如 1907 年威廉·布拉格所争辩主张的偏粒子辐射说。随着进一步的反思，我们可以说，混乱的实验局面反映了随着量子力学的问世才澄清的波粒二象性。X 射线既是粒子又是波，所以，在这个世纪之初物理学家们对它仅得到模糊的结论，是不足为奇的。大约 1910 年，似乎 X 射线可简单地视为波长很短的电磁波。假若如此，射线的衍射要求一个相应短间隔的光栅，而在 1912 年马克思·冯劳厄认识到这样的光栅可在晶体离子的原子间距中找到。实验是由慕尼黑物理学家沃尔特·弗里德利希和他的学生保尔·克里平于 1912 年春做出的。



理论家劳厄和实验家弗里德利希及克里平的合作导致了第一个 X 射线的衍射图样。同时，它提供了 X 射线是具有数量级为 10^{-10} 米的波长的电磁波的决定性证明。从慕尼黑实验生产出 X 射线研究的一个崭新分支——X 射线衍射在晶体学中的利用。以威廉·H·布拉格及其儿子威廉·L·布拉格为开路先锋，这个分支很快就在化学、地质学、冶金学甚至生物学中变得地位显赫。例如，X 射线晶体学是 1953 年确定的著名 DNA 分子双螺旋结构中的一个关键性要素。

回到 19 世纪 90 年代，伦琴的重大发现引起物理学一场小革命，激起了很多物理学家着手考察这一新现象。很少有一项新发现被科学家们和非科学家们如此热情地接受。按照一本传记统计，仅 1896 年关于 X 射线的出版物就有 1 044 份，包括 49 本著作。在参与 X 射线潮流的许多物理学家当中，有巴黎的自然历史博物馆的物理学教授亨利·贝克勒尔。

从贝克勒尔射线到放射性

1886 年 1 月法国科学院讨论伦琴的发现，在研讨会上，庞加勒提出产生射线的原因可能不是电波而是玻璃管的荧光部分。假若如此，有理由假定荧光物体除了照射光线外还发射 X 射线。庞加勒的话被荧光专家贝克勒尔听了进去，他于 1 月 24 日向科学院报告说：一种发荧光的双价铀盐硫酸铀钾，发射他认为是 X 射线的东西。他把盐放在一个裹在黑纸之中的感光板上，让其在阳光中暴露数日，然后，当底版冲洗之后，便得到一个特别黑的底版。放射性就这样被发现了吗？不完全是，因为，贝克勒尔相信，穿透的射线是荧光的产物，因此，暴露于阳光是关键的一招。一周之后，当贝克勒尔重复做实验但不用阳光照射时，他认识到铀盐甚至能在没有阳光的情况下辐射射线。他现在知道他有

了一个新发现，即：甚至在没有电作用和阳光作用的条件下，铀盐发射有穿透力的射线。这种新发现明显不同于X射线和荧光。此外，他很快还发现：其他铀盐也可以发出这种射线，而非荧光的金属铀发出的射线甚至更强。因此，这射线原先常常称为铀射线。

贝克勒尔发现发射性是幸运的，但不是偶然的。与伦琴相反，法国物理学家被一个需要检验的假设所引导，即强荧光物体发射X射线。但是，大多数荧光物质不是放射性的，那么，他为什么集中于铀盐呢？人们传统地把他的选择归结于运气，其实一点也不不是运气。早期，跟着他父亲埃德蒙德·贝克勒尔（也是巴黎国家历史博物馆的一名教授）一道，他研究了铀化合物的荧光光谱，注意到谱带遵从一个瞩目的规则。很可能是这个对荧光铀盐奇特的规则，激起贝克勒尔这样的想法：从太阳来的可见光被转换为波长短得多的光，他假定是X射线的特征。按照1852年由盖布里尔·斯托克斯发现的斯托克斯定律，这种跃迁是禁戒的。按照该定律，荧光物体只能发射波长比激发辐射的波长更长的辐射。斯托克斯定律是正确的——它来自于辐射的量子理论——但在19世纪后叶有许多关于“反常荧光”（即违背斯托克斯定律的荧光）的报道。这些报道使这一定律当时不认为是绝对正确的；而按照一个由德国物理学家尤根·洛美尔提出的一个理论，反常荧光应发生在贝克勒尔在铀盐中观察过的展示规则谱线的物质之中。如果这确实是贝克勒尔的推理的话，他选择铀化合物进行研究，就不那么奇怪了。他原先关于从暴露于阳光的铀盐发出的有穿透力的射线的观点，可能仅确认了他多少预料的东西。后续事态并不如此。

铀射线并没有引起如同X射线一样的热烈反应，而且，在一两年内，贝克勒尔是少数积极研究新现象的科学家之一。毕竟，铀射线的效应是微弱的，许多物理学家仅仅把它们视为一种特殊



的 X 射线，只是其原由不好解释。贝克勒尔相信铀射线与铀化合物的特殊谱线相关，所以，他认为没有理由假设这些射线也可由别的化合物发射。仅当玛丽和皮埃尔·居里发现一些比铀活跃得多的物质时，放射性才成为标题，成为一种对物理学家具有重大意义的现象。

钍的放射性是 1898 年独立地由玛丽·居里和德国人格哈德·斯米特宣布的。玛丽和皮埃尔·居里在铀矿物之中发现当时两种未知的元素，他们建议起名钋和镭。极为活跃的镭使放射性广为人知，在贝克勒尔的射线研究中，开创了一个令人兴奋的新时期。随便提一下，词汇“放射性”和“放射物质”是玛丽·居里于 1898 年同一年引入的。在接下来的几年里，欧洲和北美洲加入放射性研究的物理学家人数见增。“由于总有人跟踪我的足迹，我必须保持进取，”卢瑟福 1902 年给他母亲写信说，“为了保持竞争，我必须尽可能加速出版我的著作。在这考察的道路上，起跑最好的是巴黎的贝克勒尔和居里。他们在过去几年里在放射性问题上做了大量的十分重要的工作。”（Pais 1986, 62）

放射性方面的早期工作，主要是实验的和探索性的。哪些物质是放射的？由放射物体发出的射线实质是什么？这种行为会被物理变化或化学变化所影响吗？这些就是世纪之交物理学家们谈及的问题——不仅是物理学家，还包括化学家，因为放射性是化学家更为关切的。不论物理学家还是化学家，他们的进路是现象论的和探索性的；即聚焦于资料的收集与分类。那是一个极为混乱并充斥诸多死胡同的时期。例如，在这世纪的头 8 年时期里，一般都相信所有元素都是放射的。毕竟，这性质局限于几个重元素，是令人难以置信的，而且，探测的粗糙方法似乎表明：放射性确实处处存在。

在放射性研究范围内的许多论题中，射线的本质是最重要的一个。到 1901 年，业已确立：射线是复杂的，它们有三种具有

不同穿透力的类别。 β 射线在磁场中容易偏转，很快就被认定是飘逸的电子；而中性 γ 射线最终（约1912年）被发现是类似于X射线的电磁波； α 射线是某种带点神秘性的东西。早期实验表明，它们不在电场和磁场中偏转，从而是中性的。这是卢瑟福和其他一些人在很短一段时期内所持有的观点。然而，进一步的实验，主要由在蒙特利尔的麦克吉尔大学工作的卢瑟福所做，表明这些粒子带正电，并具有可与氢原子质量相比拟的质量。约于1905年，证据积累到认定 α 粒子是带两个电荷的氦原子 He^{2+} 。这假设于1908年被后来在曼彻斯特的卢瑟福及其助手汤姆孙·劳伊兹所做的实验漂亮地确证。卢瑟福和劳伊兹利用分光镜证明：氦是被来自氢发射的 α 粒子产生的。连同 α 粒子被磁场所偏转的资料，这种认识就尘埃落定了。

比放射性的本质甚至更为重要的是这样的洞见：放射性不是一种永恒的现象，它是随时间而衰减的。一种放射性物质变换成另一种物质，即从一种元素变成另一种元素——蜕变。这是1902年卢瑟福和化学家弗勒德里克·索第提议的变换定律的基本内容。按照这一定律，原子不仅蜕变，而且，它们是随机地蜕变。这表达为：蜕变具有一定的、仅依赖于放射元素本质的衰变常数（ λ ）。如果原先有 N_0 个原子，经时间 t 后原子数将减至 $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ 。卢瑟福清楚地指出：这意味着一个原子的衰变几率是独立于原子年龄的。这是最奇特的现象，甚至更为奇特的是，1903年人们发现镭连续释放出来的能量是巨大的——约1 000卡路里。这能量从何而来？假如放射性是由亚原子变化构成的，那么，变化的原因是什么？大多数科学家回避这些理论问题，但它们仍被视为合理的问题，并且，有几位物理学家和化学家思索放射性的起源。按照广泛接受的假说，基于J·J·汤姆孙的原子模型，放射性是由于原子的内部结构引起的。从1903年起，这种定性的动力学模型被汤姆孙、奥利弗·劳吉、开尔文勋



爵、詹姆斯·金斯以及其他人以不同版本提出过。卢瑟福早在1900年、1904年以及在其贝克里安的讲座中提倡过一个类似的机制。他争辩说，“放射元素的原子可假设是由处于急速运动电子（ β 粒子）和电子群（ α 粒子）所构成的。”加速的电子会辐射能量，而这“必然干扰原子的平衡，导致其成分的一种重新安排，或导致其最后蜕变。”（Kragh 1997a, 18）。虽然卢瑟福不久便决定：原子理论的状态不允许对放射性作任何确定的说明；他和其他的研究者都不怀疑，放射性可以用亚原子动力学作因果说明。事实上，这种无谓的努力一直持续到20世纪20年代中期。

我们知道：放射性是一种概率现象，这种概率的本质由衰变定律所表达。这一点是1902年卢瑟福和索第含糊地提出的，1905年埃冈·冯施怀德勒更充分地对其进行了论证。从这一点来看，包括卢瑟福和汤姆孙在内的物理学家仍然试图用亚原子的变化的因果来解释放射性，似乎是奇怪的。可是在当时，没有理由认为放射性原则上不可能是亚原子运动的结果。统计定律不相关于反因果性，毋庸说，相关于诸如布朗运动之类的其他的统计现象，在那里，统计的本质原则上可用决定论的微观过程加以解决。

想要以一个力学基础来说明放射性，设计这样的原子模型的努力是不成功的。到1910年，大多数物理学家，或者忽视这个问题，或者采取一种实用主义的态度。按照这种态度，现象学定律是被当作优先于力学来说明的。但是，放射性的统计本性不被解释为一种原则上必然要抛弃因果原理的不可约特征。这样一种解释只来自量子力学，为此之故，若把放射性视为第一个反因果现象的例子，那就错了。

形形色色的假射线

放射性、X射线和阴极射线不是1900年左右引起注意的仅有

射线。在这些著名射线被发现之后，许多宣称新发现却不能满意地被确认的事实上不存在的射线接踵而至。然而，在物理学的历史上，这些宣称不会比那些今天标签为“真实”的发现占据较小的地位。在一段时期内，某些新发现受到极大的关注，被许多物理学家所接受。例如，考虑 1896 年初被法国业余物理学家嘎斯塔夫·列邦宣布的“黑光”。他是一位心理学家和社会学家，是巴黎一个还包含几名杰出科学家的知识社团中的成员。列邦宣称探测到一种不可见的、来自一个受油灯照射的封闭盒的辐射；这辐射能在盒内的底板上产生一个影像。他进一步发现了，他所谓的黑光不可能在磁场中偏转，从而既不可能是纯 X 射线，也不可能是阴极射线。在接下来 10 年的论文和著作中，列邦捍卫他的发现；用黑光作了许多新实验，并把它解释为他和别的许多人相信的、物体的逐渐去物质化的一种显示（见第一章）。虽然列邦的宣称受到大多数物理学家和化学家的冷遇，它们在科学文献中并没有被忽视。1896 年在巴黎科学院宣读了 14 篇关于黑光的论文，而关于贝克勒尔的铀射线的论文只有 3 篇。在列邦宣称的同情者中有：亨利·庞加莱、生物物理学家阿逊纳·德阿桑法尔以及物理学家和后来挂冠诺贝尔的加布里尔·李普曼。可是，虽然这些人和别的科学家觉得列邦关于物质、电学和能量的猜想是有趣的，约在 1902 年，这主题便从科学期刊中消失了。

1903 年关于“N 射线”的假发现在某些方面跟黑光类似，但由于宣称证实这些不存在的射线数量之众，这一假发现尤为令人瞩目。1903 年当纳西大学的瑞内·布朗德罗特宣称发现一种从放电管中发射出来的新辐射时，他就是一位威望很高的实验物理学家。N 射线（“N”是纳西的缩写）可穿透金属和木材，能被聚焦、反射、折射和衍射，布朗德罗特和其他的 N 射线研究者（他们许多在纳西大学）不久发现 N 射线也被汽灯、太阳、白炽电灯、疲劳金属以及（最有人性味的）人体神经所发射。布朗德罗



特利用这些资料考察了 N 射线能谱。结论是：这现象是复杂的，有几种折射率不同的 N 射线。N 射线并不存在，但在两年的时间里，至少 20 人“看到了”射线，从而确认了布朗德罗特的宣称。在 1903 年到 1906 年间，关于这一主题的约有 300 篇论文中的主要部分承认射线的存在。

这怎么可能呢？无疑，其部分答案存在于心理要素和反映法国科学共同体的社会结构之中。一位 N 射线研究者是年轻的吉恩·贝克勒尔（亨利·贝克勒尔的儿子）。他在多年之后这样说明其早期的错误：“检验 [N 射线的] 效应所利用的方法是反科学的。当你被说服这射线存在时，你总可能用这种方法看到所期待的效应，而且，你先验地有了如此这般一个效应可能被产生出来的观念，那就不难理解欺骗观察者的幻觉了。如果你要另一个观察者去控制实验，（只要他是信服的）他也同样会看到它；而如果一个观察者（他是不信服的）看不到，你就会说他没有一双敏感的眼睛。”（Nye 1980, 153）N 射线实际上是心理-生理学（和心理-社会学的）效应。这也是德国海利希·鲁本斯和奥托·鲁梅、法国的简·佩兰和美国的罗伯特·伍德等批评家所作的结论。布朗德罗特的实验是“用一个微弱到法国境外根本无人探测到的辐射”进行的。联合的批评以及实验不能产生一个跟 N 射线一致的新结果，造成这样的局面：到 1905 年，公众舆论一致认为该射线是不存在的。在纳西，射线还多存活了几年的时间。整个故事后来被视为“病态科学”的案例，但那不是一个合理的特征。N 射线研究的发展方法跟放射性或宇宙射线物理学的早期发展并无根本的区别。相当部分的物理学家相信 N 射线的存在，而且，这种信念不是无理由的。但到头来，其理由不够强大，又与别的实验相矛盾。这故事说明科学中主观性和幻觉的作用，同时也说明通过实验的批判性重复而得到的客观性的威力。

黑光和 N 射线只是 1896 ~ 1910 年间所报道的几种射线当中

的两种。从19世纪50年代开始，人们就一直研究置于强磁场中阴极射线管产生的辐射，有些物理学家为其行为犹如磁发射脉冲的磁阴极射线提供证据。这些“磁-阴极射线”吸引了相当多的注意；物理学家们议论它们是否事实上是一种电中性的辐射，或是否可归为常规阴极射线的电子运动。杰出的意大利物理学家奥古斯托·里奇1908年相信他发现了关于他所谓的“磁射线”不可否认的证据，并把它们说成是由电子捆绑正离子成为中性粒子对形成的粒子流。从1904年到1918年，65篇关于磁射线的论文中，有2/3是由里奇和其他意大利物理学家写出的。如果说N射线是法国射线，那么，磁射线就是意大利射线了。几乎所有意大利论文都支持里奇关于磁射线的观点，但意大利境外没有一篇论文接受其主张。当新实验证伪里奇的主张时，这场争论并于1918年终止了。里奇赖以诉求的基础现象是假的，他用磁射线所做的实验便不具说服力了，他的解释被证明是错的。

关于宇宙射线的报道并不是一开始就比关于N射线的报道更好。对大气自由离子的测量约开始于1900年，当时一般认为离子源于放射性，或源于大地，或源于空气中的气态物质。偶尔也有人猜测可能有地球之外的起源。但有一段时期测量太不确定，无法确认这一猜测。如果大气辐射源于大地，那么，其强度应随高度而减弱；如果它源于宇宙，其强度应随高度增加。1910年左右所做的实验——有的在大气飞行中，有的在埃菲尔塔上——只带来混乱。有的不显示随高度变化，有的显示增加，有的显示减少。只有奥地利物理学家维克托·赫斯在1902年的一次5350米高度的气球飞行中得到一些可靠的数据。他发现：辐射强度先减少，但随后在约1500米高度以上便随高度明显地增加。他的结论是：“一个具有很强穿透力的辐射从上方进入我们的大气。”（Xu and Brown 1987, 29）这结论被德国人维尔纳·科尔赫斯特所确认，他在1914~1917年把他的气球升到最大高度9300米。由



于这些测量，本性未知的、穿透的宇宙射线的存在就确立了。当密立根于1922~1923年进行他的无人气球测量时，他不能确认赫斯和科尔赫斯特的结果，断言穿透射线并不存在。可是，两年后他发现了高穿透辐射，定名为“宇宙射线”，但在其报告中未提及欧洲很早就得到的结果。然而，赫斯最终被承认是宇宙辐射的真正发现者，并于1936年为此发现获得了诺贝尔奖。在1895~1912年期间大多数宣称新发现一览参见表3.1。

表 3.1 1895~1912 年间的宣称新发现及其在 1915 年时的地位

项 目	年	科 学 家	地位, 1915
氩	1895	瑞利和 W·拉姆齐	接受
X 射线	1896	W·伦琴	接受
放射性	1896	贝克勒尔	接受
电子	1897	J·J·汤姆孙	接受
黑光	1896	G·列邦	拒绝
管射线	1898	W·维恩	接受
以太子	1898	C·布拉西	拒绝
N 射线	1903	R·布朗德罗特	拒绝
磁射线	1908	A·里吉	怀疑
莫瑟射线	1904	J·布拉斯和 P·斯扎玛克	被重新解释
正电子	1908	J·贝克勒尔	被重新解释
宇宙射线	1912	V·赫斯	未定

注：1886年尤根·哥尔德斯坦把阴极射线管中的管射线或正射线视为同一物；它们被发现是由气体离子所组成。以太子是查尔斯·布拉西宣称发现了的纯以太组成的元素的名称。莫瑟或金属射线首先由物理学家

L·F·莫瑟于1984年提出，有时被认为是由被照射金属或其他物质发射的射线。这现象被解释为本质上是光-化学的和电-化学的。

汤姆孙以前的电子

虽然1897年是电子的正式诞生年，如果宣称J·J·汤姆孙就是在那年发现了电子，那就太天真了。电子有一个有趣而复杂的历史，这可合理地追溯到19世纪早叶。按照大家偏爱的一种电子理论的观点，物质由一些及时相互作用的荷电粒子组成，或者包含这些粒子。这种电与磁的进路可追溯到30年代的安德列-马里·安培和奥塔维阿诺·莫苏第，并在一本俄罗斯科学家弗朗兹·埃皮纳斯的著作中发现其早在1759年的一个雏形。后来在19世纪它被几个包括鲁道尔夫·克劳修斯、威廉·韦伯和卡尔-弗里德利希·泽尔纳在内的德国物理学家极大地发展。在这理论中，假设中的电子被认为是物质和以太两者的基本构成。在这方面，粒子对应于后来的电子。在19世纪50年代和以后，韦伯和其他人试图从正、负单位电荷 $+e$ 与 $-e$ 构建物质和以太的模型，这里的 e 是未知的单位电荷。可是，由于麦克斯韦的名气正在增长，电子在他那里没有地位，这些理论也就被大多数物理学家放弃了。

关于电子的现代观念的一个不同来源，可在迈克尔·法拉第的电解定律特别是爱尔兰的乔治·约翰斯通·斯通尼和德国的厄曼·冯亥姆霍兹主张的粒子解释中找到。独立于斯通尼，亥姆霍兹于1881年在他的法拉第讲座中，力挺“电原子”的本原。斯通尼-亥姆霍兹电子可为正电荷，亦可为负电荷。跟后来的电子概念相反，它们被想象为单位电量，而不是一个居留于一切物质形态之中的粒子。可是，在其某些著作中，斯通尼不仅把他的电子关联于电解，而且还关联于光的发射。1891年他提出在分子或



原子中旋转的电子可能说明谱线，这一观念十分接近于被后来的电子理论家接受的一个观点。

第三个版本出现于 19 世纪 90 年代早期，相关于最初由荷兰的亨利克·A·洛伦兹和英国的约瑟夫·拉摩引入的“电子理论”。（洛伦兹与拉摩的理论在许多方面不同，但就我们的目的而言，我们可忽略其差异。）跟其他版本不一样，洛伦兹-拉摩电子是电磁场概念的一部分，被设想是连续以太中的一种结构。这些特别的结构通常冠名为“荷电粒子”或“离子”。但在其 1894 年的理论中，拉摩引入了斯通尼的词汇“电子”，以表示电磁以太中一种奇异性。不论名称如何，由洛伦兹和拉摩引入的概念原先是高度抽象的、不必显示为可观察为粒子的一种客体。他们的荷电粒子没有特定的电荷和质量，通常不视作是亚原子的。拉摩的电磁电子原先是以太中的一种自由结构，但从约 1894 年起他开始把电子想象成也是物质的一种基本单元，或带正电，或带负电。例如，1895 年他提出“分子〔原子〕或由旋转电子的稳定形态组成，或包含这种形态”。（Larmor 1927, 741）至此，电磁电子进入了原子理论，尽管那是以一种松散的形式。直到 1896 年，以上三条途径中，没有一条涉及其荷质比远大于电解测定的离子荷质比的粒子。

1896 年由于皮特·塞曼发现光的频率与极化受到磁场的影响，电子概念化出现了一个大变化。塞曼观察到钠的黄色谱线增宽，这不仅是理论未曾预料的，而且似乎跟洛伦兹和拉摩电子理论中关于光发射理论相矛盾。当塞曼向其原先的老师现在在莱顿大学的同事洛伦兹报道他的结果时，洛伦兹的反应是：“这看起来真的不妙；它一点也不跟期盼的相符。”（Arabatzis 1992, 378）可是，原先看似严重的反常很快就转变为对于电子理论的绝妙确认。按照洛伦兹的观点，光发射是振动的“离子”引起的。面对塞曼的发现，他以简单情况计算了当磁场作用于光辐射时应有何

效应。结果是：原先的锐频率分裂为 2 或 3 个不同的频率，宽度取决于离子的 e/m 。塞曼观察到的是模糊的谱线增宽，而不是谱线的分裂。但是，在洛伦兹预言的引导下，他在后来的实验中发现了分裂的谱线。此外，从观察到的增宽可得到令人瞩目的大 e/m 值，数量级是 10^7 电磁单位/克，或约为氢电解质的 1 000 倍（1 电磁单位等于 10 库仑）。尽管洛伦兹的第一反应是这个结论对他们的理论是“太坏了”，但他现在认识到：如果离子振子（电子）具有这么大的 e/m 比，那么，理论与实验便可调和起来。另一个重要结果来自于洛伦兹的分析，他认为可观察的成分的极化要求振子是荷负电的。

塞曼效应，以及诸如金属的电导性和光性质，把洛伦兹和其他人引向一个更有限和确定的电子概念：它现在越来越被视为一种亚原子，一种电荷很大、质量很小或两者的某种组合的亚原子。在塞曼发现之前，拉摩曾赋予电子一种可跟氢原子比拟的质量；在这发现之后，正在 J·J·汤姆孙实验之前，他愿意考虑电子具有远小于氢原子的质量。在几个月之内，整个问题被阴极射线实验研究所得到的新结果的光芒所照亮。

第一个基本粒子

如我们所见，当 J·J·汤姆孙于 1897 年做他著名的实验时，电子是众所周知的，不过是假说中的客体。然而，这不是说，汤姆孙在实验中发现了洛伦兹和其他人在理论上预言的东西。汤姆孙的粒子原先被认为是不同于电子的各种早期版本的。花费了几年的时间，才把不同的形象合并成一个单一的和统一的电子概念。

在 1896 年以前，阴极射线的本质问题——它们是粒子的、还是以太的过程？——在英国是不太讨论的。伦琴的发现把阴极



射线推到了前台。主要是这一发现，使得汤姆孙研究起物质来；所以，可以说不仅放射性随 X 射线被发现而觉醒，而且，电子也随之发展，不过不那么直接。确信阴极射线是粒子的之后，汤姆孙决定测量其速度及其 e/m 值。在其第一轮实验中，他靠的是把测磁场中的偏转与测射线动能的卡路里（热电的）方法结合起来测量这两个量。因为实验表明： e/m 值跟阴极材料和管中气体无关，他提出阴极射线的粒子物质的普适亚原子成分。当时，他还未能证伪赫兹实验，那实验是反微粒假说的。但这不让他担心，因为他相信：赫兹实验失败是因其放电管真空度不够，因而不知道看不到偏转是残存气体导电的结果。

在另一个稍后的实验中，汤姆孙用高真空的射线管致使阴极射线在静电作用下偏转，证明了他是对的。利用横向磁场和静电场操作阴极射线，他用得心应手的另一种方法测量 e/m ；他得到的新结果跟原先方法的结果相吻合。在其出版于 1897 年 10 月《哲学杂志》的著名论文中，汤姆孙重申和详述了他早期关于阴极射线的本质和意义的结论。首先，他发现 e/m 的数量级为 10^7 电磁单位/克，他第一次把这解释为小质量与大电量的结合。不久，他改变想法，认为这一电量等于电解质的单位电量，意味着阴极射线粒子的质量约小于氢原子质量 1 000 倍。其次，他从微弱的证据大胆地假设：这粒子是一切物质的成分，是长期寻觅的不可分原质，“它一直是许多化学家所经营的”。汤姆孙还提出：在靠近阴极的强电场区发生原子的分解，即气体分子（不是阴极）被分裂为它的成分“原质的原子，我们将简称之为微粒子”。在汤姆孙看来，关于阴极射线本质的阐明，在原子理论的范畴内具有根本的意义：“在阴极射线中，我们发现了处于一种新状态的物质，在这状态下物质的分解比通常气体的分解彻底得多：在这状态中的物质……是一种相同的、一切化学元素由其构成的物质。”（Davis and Falconer 1997, 169）

汤姆孙关于微粒子普适性的断言，是一个只有皮毛实验基础的大胆假说。它根本不是从实验归纳演绎而来的结论，但它是一个汤姆孙为其作了充足准备的结论。多年来，他一直思考着这些观念，用类似于化学家的思维方式，而且，在其 1897 年的亚原子微粒子论与多年前他所思考的涡旋原子论之间，存在许多惊人的相似之处。在其第一次作 e/m 测量前不到一年的时候，在一次关于 X 射线的吸收的讨论中，他提出：“这似乎支持布洛特关于不同元素是同种原质元素的化合物的观念。”（Thomson 1896, 304）就灵感而言，他的发现断言和关于微粒子的概念，似乎极少蕴涵现代电子理论。威廉·普罗特、诺曼·洛克耶和克鲁克斯要比拉摩、塞曼和洛伦兹更重要。塞曼-洛伦兹关于亚原子电子的结论与汤姆孙的观点一致，但对它的影响不大。

汤姆孙把他的原本粒子命名为“微粒子”。当时“电子”的名字已在使用中，而且电子理论正上升为理论物理学的一个时髦分支，他为何不用这个名字称呼他的粒子呢？简单地说吧，汤姆孙并不把他的粒子想象成同一于塞曼-洛伦兹粒子，所以选择另一个名字以强调其区别。按照汤姆孙的观点，阴极射线微粒子不是以太的——无物质的电荷，如电子理论家们认为的——而是荷电的物质，具有化学本性的元-原子。在其 1897 年 10 月的论文中，汤姆孙简略地考虑了把微粒物质从属于“直接化学考察”的可能性，接着否定了这种想法，因为，在阴极射线中所产生的微粒物质的量是太少了。

微粒子与自由电子的同一性是乔治·菲兹杰拉德在汤姆孙宣布其发现后首次提出的。它的特色在于，菲兹杰拉德对这一进步作了重新解释，他“不假定电子是原子的一个组成部分，也不分解原子，完全不同于炼金术之类模式”。（Falconer 1987, 273）然而，这恰是汤姆孙所假设的观点。按照他的观点，原子不仅是由微粒子组成的，而且它也可被破碎成微粒子。



汤姆孙因发现电子而称著，因为他提出了微粒子是物质的亚原子成分——基本粒子；因为他以实验证据来支持他的观点，并且，因为他的同时代人和后来的物理学家接受并充实了他的发现。他并非单靠测量阴极射线的 e/m 就发现了电子的。同一时期，比汤姆孙更精确的测量是由德国的埃米尔·维彻特和沃尔特·考夫曼作出的。维彻特第一次结果是 $e/m = 2 \times 10^7$ 电磁单位/克；考夫曼最初得到的结果约为 10^7 电磁单位/克，后来同一年，他改进为 1.77×10^7 电磁单位/克。汤姆孙的平均值是 1.76×10^7 电磁单位/克。虽然，考夫曼跟汤姆孙一样变换了阴极的材料和管中的气体，他并未从资料中提出阴极射线是微粒子的结论。维彻特提出过，但没有像他的剑桥同事那样作横向推广，从而与物理学历史上最重要的一次发现失之交臂。

汤姆孙关于微粒子或电子的观念，得到了来自广泛现象领域研究的很快确认。接近于汤姆孙提出的 e/m 值的电子，在光电效应、 β 放射性和热电子现象中被探测出来，而且，它们是从磁学、金属导电和化学反应推断出来的。为了决定电子的质量，必须测定它的电量，这是 19 世纪最后一年由汤姆孙及其在开文迪什实验室的助手们（特别是查利斯·T·R·威尔逊和约翰·汤森德）做出的。到 1899 年，他们得到了一个接近电解中氢的值，对应于电子的质量比氢原子质量小 700 倍。在同一时期内，电子概念稳定了；而在世纪之交，微粒子-电子的同一性被普遍接受，汤姆孙反对它们同一性的观点不被认同。对别的物理学家普通称呼的电子，汤姆孙几乎独自使用着“微粒子”这一称呼。那时，他把粒子的质量看作是电磁的，那有助于形成电子的一致观点。电子已成了一种成熟的观点，其他的变化留给未来。

1896~1900 年间发生事件的一个重要结局，就是普遍接受正、负电荷的不对称性。塞曼电子是负的，汤姆孙的微粒子也是负的。在 20 世纪的头几年里，早期电子理论中的正电子被摒弃

了。个别物理学家宣称发现了正电子的证据，但他们的宣称未被严肃看待。“如果有一件事在电学的新近研究中被确立，”诺曼·坎普贝尔于1907年在其《现代电学理论》中写道：“那就是正、负电量之间的基本差别。”（Kragh 1989b, 213）总之，20世纪早期的电子是带负电荷的；具有氢原子质量的千分之一的质量；质量被认为是部分或全部电磁本原的。电子可自由地存在，或束缚在物质之中，并被承认是一切原子的一种成分——或甚至是唯一成分。

第四章 | 原子的建构学

汤姆孙原子

关于原子构成的特殊观念可追溯到电子发现之前的几十年，但有了这种新粒子之后，原子模型才获得一种更为实在的地位。电子作为物质的建筑基块，它直接导致关于原子内部的第一个精细模型。汤姆孙的“葡萄干布丁”重要模型，由因受正电流体作用而处于平衡位置的电子组成。这模型是在其 1897 年论文中首次阐明的，但他为此付出的思考却花了几年的时光。

一个重要的来源是涡旋原子论，按照这理论，原子被想象成是理想而渗透一切的流体中的涡旋。另一个来源是美国物理学家阿尔弗雷德·迈耶于 1878 年做的一个实验。迈耶让一些浮于水面上等价的磁针感受一个中心磁铁的吸引力，他注意到磁针的平衡位置是一些同心圆周。开尔文勋爵（当时仍是威廉·汤姆孙）立即意识到这实验为涡旋原子论提供了一个很好的类比。这一类比被年轻的 J·J·汤姆孙在其获 1883 年亚丹姆斯奖的论文中启用。在论文中，他对开尔文的涡旋理论作了详尽的数学处理。在其著作中，汤姆孙（从现在起，“汤姆孙”指的就是 J·J·汤姆孙）从理论上考察了等距排列在一个圆周上的许多涡旋的稳定性

问题。对于7个以上涡旋的情形，计算变得高度复杂。作为引导，他参考了迈耶的磁铁实验。

汤姆孙假定他的基本涡旋是足够强的，这不仅简化了计算，而且与他倾于物质一元论的意向相一致。在其1883年的涡旋序列与其后来关于电子序列之间存在一种明显的相似。虽然跟大多数其他物理学家一样，汤姆孙约于1890年摒弃了涡旋原子论，他继续喜爱这一观念。1890年他把元素的周期系统与涡旋原子模型结合起来，并指出涡旋序列与化学元素中发现的规则性之间的上述相似性：“如果我们设想所有化学元素的分子〔原子〕是由同种原质原子〔基本原子〕所组成，并把原子量的增加解释为表明这种原子数目的增加，那么，按这观点，随着原子数目的连续增加，将会发生结构的种种奇异性。”（Kragh 1997b, 330）显然就在发现电子的前几年里，汤姆孙倾向于把原子想象成原质原子的一个系统。

在其1897年10月的论文中，汤姆孙提出原子是由大量微粒子（电子）组成的，可能被中心力束缚在一起。根据迈耶实验，他指出电子位形是一种环状结构，而且这种位形可能说明周期系统。汤姆孙模型的第一个版本中，原子被想象成电子与“空穴”的一种组合。所以，假定电子之间受库仑力作用，没有吸引力保持原子不炸开来。两年后，汤姆孙提出了一个更确定的假设，在其中他明显表述了不久后被称为汤姆孙原子模型的东西：“我把原子视作是包含大量我将称之为微粒子的小物体。……在正常原子中，这些微粒子的集合形成一个电中性的系统。虽然个别微粒子行为像负离子〔电荷〕，当它们被组装在一个中性原子之中时，其负效应依然被某种引起空间的东西所平衡，通过空间电子被摊开，譬如它具有一种总量等于微粒子的负电荷总量的正电荷。”（Kragh 1997b 330）只是在1903年，稍后于他熟悉了被开尔文勋爵提出的多少类似的模型，汤姆孙才开始把这观念发展成一个定



量的模型。

经典的汤姆孙原子模型的实质，在他的1904~1909年间的著作与论文中，为简明起见，汤姆孙极大地限制其分析，仅考虑平面上一些由电子构成的旋转环，它受到来自于均匀正电球体的弹性力的作用。通过计算他考察了平衡位形的力学稳定性，取消那些不稳定的位形。汤姆孙所涉及的计算十分类似于20年前他用于其涡旋原子工作上的计算。他把一个适用于大数量电子的更近似的方法用于其复杂的计算中，表明：电子会排列在一系列同心圆环上，环上电子数目随环的半径而增加。1904年，他的平衡位形的例子是：当 $n=37$ 时，为1, 8, 12, 16；当 $n=56$ 时，为1, 8, 12, 16, 19。加速的电子会发射电磁能，因此，汤姆孙必须确保他的原子不会因辐射而不稳定和塌缩。应用1897年拉摩推导的一个公式，他得以证明：辐射随环中电子数目的增加而戏剧性地减少；对于大多数原子来说，辐射可予忽略。原始的汤姆孙原子是力学稳定和辐射稳定的。

汤姆孙意识到他的原子模型必须推广到球模型，但没有预计到如此推广随之而来的巨量计算。毕竟，现实原子中的电子数目是未知的，所以，与元素的物理化学性质作比较是办不到的。当时，许多物理学家认为这模型无疑是1904~1910年间最大众化的原子模型，是关于原子真实组成的一个良好模拟。在1909年哥廷根的一次讲座中，马克思·波恩称赞它“俨如一位演奏发光原子大交响乐章的钢琴家”。卢瑟福和洛伦兹也认为这模型是诱人的，并将其应用于他们自己的工作之中。模型诱人之处特别在于它的一元本性，允诺把一切物质归结于电子，这是与电磁学世界观相一致的。其次，汤姆孙的计算以令人生畏的数学权威武装着模型，尽管大多数物理学家很少注意电子位形的细节。可是，当它面临经验的裁判时，这模型就不那么引人入胜了。它能够定性而模糊地说明诸如放射性、光电效应、色散、光的发射、塞曼效

应，更不必说周期系统等现象。此外，它允诺说明许多化学事实，因此缘故，很受化学家的青睐。但是，在大多数情形中，说明是启发性类比，而不是基于模型细节的演绎。汤姆孙模型在概念上和经验上是可疑的。

这一点从开始就是明显的。弱点之一是正电量，它被认为是无摩擦、无质量的，以至最终是负电子的一种显示。如1904年汤姆孙在致奥利弗·劳德吉的信所写的：“我总怀有希望（没有实现）不要正电荷作为一种分离的客体，想用粒子的某种性质取代之。……我想，人们觉得正电化将证明是多余的，而且，从微粒子的某些性质得到我们现在归之于它的效应，是可能的。”（Dalh 1997, 324）汤姆孙从来没有成功地说明正电荷是一种副现象。但是，从不同的实验证据，他得出结论：电子数可与原子量相比拟。这结论很快被普遍接受。在随后的几年里，越来越多的证据表明：这个数可能甚至更小，也许对应于周期系中的序数。（电磁惯性反比于电子半径而变化，所以，对于原子维度的物体来说，是可予忽略的。）劳德吉称汤姆孙关于电子数的估计“是对于物质的电磁论的严重的一击”，是不奇怪的。

不仅对于物质的电磁论，而且，尤其对于汤姆孙模型的可信度而言，电子数小是一个问题。1904年汤姆孙不需要把他的模型与其他真实存在的模型相匹配，因为，即使在最轻的原子中也有几千个电子，那是无法建立这种匹配的。1910年左右有良好理由相信氢原子只含1个电子，氦原子含2个、3个或4个电子，等等；这意味着汤姆孙模型的计算可能对抗真实元素的物理和化学性质。在最轻元素的情形中，不再争辩电子数太大或三维计算技术上不可能。虽然，汤姆孙无视问题的存在而我行我素，但是，模型与实在之间不存在直接吻合，是一清二楚的事。

还存在别的更具经验本性的问题，特别地，汤姆孙模型需加特别的假设才能说明光谱的已知规则，如巴尔末定律。事实上，



汤姆孙的理论几乎对大多数谱线都提出了挑战。因为，按照汤姆孙的观点，光是由电子振动发射的，这要求电子的数目必须具有与被观察的谱线数相同的数量级。基于一百个或更少的电子的振动怎能理解许多金属发现的成千上万条谱线呢？

新的实验给汤姆孙原子带来一些新问题。汤姆孙用多重散射来说明 β 散射，就是说，被观察到的散射是在原子电子上散射的集合效应。以此为基础，他试图公平而满意地说明实验资料。但当面对 α 散射结果时，汤姆孙的散射理论失败了。但是，卢瑟福的有核原子观念却精彩地说明了这些结果；因为这个缘故，传统上把 α 散射看作是两种原子理论的判决实验。可是，如果把汤姆孙原子的让位视为只是曼彻斯特 α 散射实验的结果，那会是一种误导。一个理论的被拒绝，不会仅因为它不能说明某些现象。汤姆孙原子理论的被拒绝是一个渐变过程。在这一过程中，积累着反常，越来越清楚这模型不能发展成一个令人满意的状态。到 1910 年，在卢瑟福提出其有核原子之前，汤姆孙模型已经退出了潮流，不再被大多数物理学家视作珍宝了。极少的人，包括 1910 年埃里西·哈斯和 1912 年的路德维西·弗普尔，继续考察这个模型，但这些考察原本是数学的，跟实验家所研究的真实原子不相干。在 1910 年的一本著作中，他建议把普朗克常数关联于一个汤姆孙氢原子的大小。利用一些相当人为的假设，他得到了用原子大小和电子质量与电荷表述的普朗克常数和里德堡常数的公式。他的模型是把量子理论应用于原子结构的第一次尝试。但是，哈斯的途径本质上是经典的：他要用原子理论来说明作用量子，而不是用量子理论来说明原子结构。

在 1913 年第二届索尔维大会上，物理学家们听取了汤姆孙原子模型的最后定论。汤姆孙用一个经适当修改的模型来说明 α 散射，以及光电子能量与入射光频率之间由实验指示的线性关系。假定正电球的电荷密度离中心而减少，并加上几条人为的假

设，他能得出用电子电荷与质量表述的、具有普朗克常数的光电定律。可是，整个程序太特殊与拼凑，弄得听众莫名其妙：这就是汤姆孙为拯救一个曾经有用的原子模型和避免量子理论的非经典特色的最后一搏。

其他的早期原子模型

在 20 世纪头十年里，汤姆孙模型虽是最重要的，但不是唯一的原子模型。承认电子是物质的一个普适成分，激励着物理学家们提出形形色色的模型，其中大多数是短命的和仅仅是猜测性的。这些原子模型具有其起源并被讨论，主要是在英国。在欧洲和北美洲，人们对原子结构的兴趣是有限的。所有模型都包含有电子；它们的区别是以不同的方式安排必要的正电荷。1901 年开尔文独立引入汤姆孙的电子处于正电流体的球内理论。开尔文的模型显然与汤姆孙的有许多共同之处，但它更为定性，没有用到电子的现代观念。开尔文喜欢称他的负粒子为“电子”，可能是为了把他的与汤姆孙、洛伦兹和拉摩的电子相区别。在写于 1902 ~ 1907 年间的论文中，高龄的开尔文（他卒于 1907 年，享年 83 岁）把他的模型应用于各种现象中，包括放射性，他认为后者是被某种外在机制——或许以太波——所激发的。依靠他的模型引入非库仑力，他得以自我满意地避免做出关于放射性是储存于原子内的能量的“根本不可能”结论。开尔文的想法被其他英国物理学家礼貌地予以忽略。

汤姆孙-开尔文模型是劳德吉纳入其 1906 年的著作《电子》之中关于原子结构的假说之一。另一个假说是这样的：原子“由正、负电量互锁成不可分离成单元的东西组成”。这是勒纳德所喜爱的模式，按照他的想法，基本结构是急速旋转“动力学”，一种电对偶。勒纳德在 1903 ~ 1913 年间的几本著作中发展了他的



思想，但不能吸引其他物理学家的兴趣。另一个跟勒纳德说法竞争的假说是：“原子体可以如其所似地、由一群正负电子相间地组成，因其相互吸引力而捆绑成团。”（p. 148）。虽然一般认为正电子并不存在，詹姆斯·金斯为了说明线光谱机制，1910年还是提出了上述图像。应对电荷系统不可能平衡的反对意见，金斯提出库仑定律在极短的距离处会失效。不顾实验家们关于电子电荷和质量的测量，金斯考虑一个理想的原子，在其中有几乎无数个（实际上无质量）电子集中在原子的外层。于是正电子有效地和方便地藏匿在原子内部。利用这些和其他的人为假设，他得以导出跟观察到的相一致的谱线系。一个多少有些类似的模型，5年后由瑞利勋爵提出，其唯一目的同样是计算谱线。在1913年以前的所有原子模型中，光的发射都被认为是电子振动的结果。有趣的是在其论文的末尾，瑞利考虑这样的可能性：“谱线中观察到的频率，可能根本不是干扰频率，或通常意义下的振动频率，而是形成由稳定条件所确定的原子原始构成的实质部分。”（Conn and Turner 1965, 125）可是，他并没有发展这一思想，它后来成了玻尔的量子原子的一个关键部分。

劳德吉提及的另一个原子模型是把原子想象成一个太阳系，电子（“像星状”）绕着一个集中了正电荷的中心旋转。这类设想首先是由法国化学家和物理学家简·佩兰在1901年一篇通俗文章中提到的。佩兰认为这模型可说明放射性和光的发射，但是，其说法是粗放的，而且，他没有注意他的行星原子的稳定性问题。将原子和太阳或银河系之间的微观-宏观作一类比，在当时是流行的；而且，它一直是为何行星模型受到某种关注的主要理由。精细的构架是长岗半太郎提出的。他的“土星”模型于1904年与汤姆孙理论发表于《哲学杂志》的同一期上。就其密切相关于麦克斯韦1856年关于土星环稳定性的分析而言，长岗明显受到天文学的影响。日本物理学家假设电子被均匀安置在绕正电吸

引中心核运动的环上。跟汤姆孙和其他模型建造者一样，为确保其结论的可靠，长岗补充说：“化学原子的实际序列可能远远超过数学处理的种种复杂性。”（Conn and Turner 1965, 113）长岗的计算导致拟议中的谱线公式和关于放射性的一个定性说明。可是，它们受到一位英国物理学家乔治·绍特的严厉批评。他认为长岗的假设是自相矛盾的，而且，模型不可能导致论文所宣称的与实验资料的一致。于是，长岗的模型从舞台上消失了，仅以一个完全不同于卢瑟福的有核理论对照物存在于电子理论的历史中。

1911年约翰·尼科尔逊，一位在开文迪什实验室工作的数学物理学家，提出了一个多少与长岗的相类似的原子模型。尼科尔逊的雄心是从他认为仅存在于恒星中的原型原子的组合中导出化学元素的原子量。他考虑正电荷具有电磁本原，因此远比电子小，居于原子的中央；在球中绕核旋转的是电子。跟大多数其他模型建造者不同，尼科尔逊试图说明实际原子的结构，尽管利用了假设的原型原子。于是，在他的方案中，氢包含一个三电子环，而最简单的原型原子是二电子系统，他称之为“coronium”。利用各种假设，他设法说明大多数元素的原子量。跟他以前的哈斯一样，尼科尔逊从普朗克的量子理论引入概念以便说明线光谱。从而得到他对普朗克常数的一种原子解释，并得出结论：原型原子的角动量必须是这常数的倍数。这就是说，他得到了量子化规则 $L = nh/2\pi$ 。这看来很像玻尔两年后的推理，但尼科尔逊模型实际上不是关于原子的量子理论。它是以经典力学和电磁学为基础的。十分类似于汤姆孙的进路而非玻尔的进路。尼科尔逊在1911~1914年间的论文中继续发展他的理论，受到其他英国物理学家的积极响应。然而，到1915年，尼科尔逊模型属于过去而不属于未来，已是不言而喻的事了。



卢瑟福的有核原子

1898~1907年，在蒙特利尔的全盛时期，欧内斯特·卢瑟福并不特别关注原子模型。因为对模型的表达方式有兴趣，他渐渐喜欢上了汤姆孙模型，他发现那对理解放射性有用。直至1900年卢瑟福才认真转向原子理论，主要是由于他对 α 粒子的行为和本性有着深厚的兴趣。1908年，他确定地显示了 α 粒子就是带两个电荷的氦离子。同年，汉斯·盖革，一位在曼彻斯特同他一道工作的德国物理学家，报道了 α 粒子被金属散射的结果。盖革注意到一个值得注意的散射；第二年，他在欧内斯特·马斯顿（当时一位仅20岁的大学生）的合作下，更彻底地考察了这个问题。他们发现：作为反射物质，较重元素的效率远远高于较轻元素；当8 000个 α 粒子打在一片薄铂箔上便有一个 α 粒子被反射。当卢瑟福得知此结论时，据传他认为那是“我一生中碰到的最不可信的事件……几乎是不可置信的，就像用15英寸的炮弹瞄准一张纸片，它会回转头来打中自己”。这段常被引用的话是卢瑟福在1936年说出来的，但这不可能是他在1901~1910年间的反应方式。从几乎空空如也的有核原子视角来看，这话有其意义，但卢瑟福在1909年没有这种观念。他当时仍然认为原子是汤姆孙式的。无论如何，这些实验诱导卢瑟福考虑 α 粒子散射，并把结果跟汤姆孙关于 β 粒子的散射理论相比较。按照这一理论， β 粒子是原子电子产生的多重微角散射；理论似乎与实验吻合得很好。

按照汤姆孙理论， α 粒子具有原子尺度，约包含10个电子。相反，卢瑟福相信 α 粒子必须视为点粒子，像电子一样。由于 α 粒子是敲掉了两个电子的氦原子，这意味着，它有效地就是氦原子的一个有核模型。卢瑟福在发表他的散射理论之前得到了这个

重要结论，他的散射理论依赖于他的类似点 α 粒子的观念。1911 年卢瑟福提出的这个理论，在盖革-马斯顿关于大角散射实验的观察中有其实验基础。卢瑟福发现的多重电子散射理论是跟大角散射不相容的。为了观察到大于 90° 的偏转，散射必须发生于 α 粒子与电荷大而集中的质量之间的一次单一遭遇上。因此，卢瑟福提议原子由被相反电荷云环绕的重电荷 Ze 所组成。由于他的计算结果跟电荷符号无关，所以，原子核同样也是嵌在均匀正流体之中的电子集中体。这跟汤姆孙原子的特殊情况不无相似。用卢瑟福的话来说：“考虑一个原子，在其中央有一个电荷 $\pm Ne$ ，这中心被电荷 $\mp Ne$ 所包围，假设这电量均匀分布于半径为 R 的球体内……为方便计，[中央电荷的] 符号假定为正。”（Conn and Turner 1965, 138）基于其关于原子的有核形象，卢瑟福导出了著名的散射公式，给出了散射几率（截面）对于散射角、入射 α 粒子的能量和散射材料的厚度和电荷的依赖关系。

卢瑟福的有核原子公平地被认为是物理学历史上的一个里程碑。可是，在 1911 年或 1912 年的一个局外人绝不会这么看。当 1911 年春这模型被引入时，遇到回应是不同，很少有人把它视为一个关于原子组成的理论。在 1911 年索尔维大会（卢瑟福是与会者）的论文汇总里，没提及原子的这个新概念，各物理期刊也没有对它作广泛的讨论。例如，在他 1913 年的《放射性及其辐射》的关于放射性教科书中，700 页的篇幅只有 1% 涉及新发现及其蕴涵。按照卢瑟福的观点，原子虽小，但不是点状。相反，卢瑟福把它想象成一个高度复杂的物体，靠着某种被称作核力的东西捆绑在一起：“实际上，原子的全部电荷与质量被囚禁在半径不到 10^{-12} 厘米的球体内。无疑，原子的正电荷中心是运动着的复杂系统，部分地包含有氦原子和氢原子。看来，物质的正电荷原子似乎在很短的距离上是互相吸引的；否则，很难理解中央的各部分会捆绑在一起。”（放射性及其辐射，p. 620）。



开始对有核原子缺乏兴趣是有其原因的，因为卢瑟福原本是作为一种散射理论提出他的研究的，把它作为一种原子理论只是第二位的。作为一种散射理论，它取得了适度的成功，但其实验支持是有限的和间接的；作为一种原子模型，它是不完全的，甚至可能显得是无望的和特设的。卢瑟福利用散射资料论证原子的质量集中于很小的核上，但他提不出电子配置模式。为简单起见，他假设电子是围绕着核的均匀气云。但由于电子在散射中无足轻重，这正好是一个武断的形象。“拟议中的原子稳定性问题，在此阶段不必考虑，”他写道，“因为这将明显依赖于原子的精细结构以及各荷电成分的运动。”（Conn and Turner 1965, 138）1911年卢瑟福没有提出行星模型，因此，当面对诸如化学键和周期表等化学问题，他的模型是完全无力的；当面对诸如谱线规则和色散等物理问题时，它也好不到哪里去。此时，尼可尔逊独立地提出他自己的有核模型，认为汤姆孙的模型只是“长岗关于原子的简单土星系统提议的一种复活，不过包含了一个单一的、正电的核”（Heilbron 1968, 303）。顺便提一下，卢瑟福原先写的是“中央电荷”；“核”一词似乎首先是尼可尔逊采用的。

1913年，盖革和马斯顿发表了 α 粒子散射的新资料，包括10万次闪烁的全部计数；这时卢瑟福原子模型的命运才得以改变。他们的资料与卢瑟福的散射公式出色地吻合，并且，“强有力地证明了卢瑟福基础假设的正确性，即：原子在其中心有一个其尺度远小于原子半径的强大电荷。”（Stehle 1994, 221）然而，这只是对卢瑟福原子模型的从散射理论角度观察的一种确认，而不是对于模型的其他方面的确认。盖革-马斯顿的结果是跟电子位形不相干的，正如卢瑟福模型对它们缄默一样。仅当它包含电子系统时，原子理论才会真正被认为是令人信服的。毕竟，电子是原子的一部分，是绝大多数可被实验检验的原子现象的主体元素。这个曼彻斯特物理学家所不知晓的重要方面，却意外地被一

位年轻的丹麦物理学家所补充，他把卢瑟福关于有核原子的形象转变成一个有核原子的合适理论。

原子结构的量子理论

尼尔斯·玻尔并非原先就对原子理论感兴趣的。他撰写其关于金属的电子理论的博士论文，发现这个由洛伦兹、J·J·汤姆孙和其他人发展的理论，在细节上和原理上都不能令人满意。“失败的原因可能是这样的：电磁理论并不同物质中的实际条件相一致”，他在1911年的用丹麦语发表的博士论文中写道。玻尔提议：非力学约束，或他称之为“一种本性完全不同于通常力学的那类力”，必须被引入进来，才能使金属的电子理论跟原子的内部结构相一致。但是，1911年他并没有考虑原子的结构，对于所需要的约束或假说也没有清晰的观念。1911~1912年，他在英国度他的学术假，先在剑桥跟J·J·汤姆孙，后在曼彻斯特跟卢瑟福继续他关于金属电子论的研究，但不久就集中于卢瑟福提出的原子新形象，玻尔发现那是极有诱惑力的。他意识到：有核原子需要用一种电子结构使之完善，而这又要求某种非力学假设来使原子稳定。玻尔的思路产生了“曼彻斯特备忘录”，一份1912年夏的文件，记述了他向卢瑟福表达的思想。在这份备忘录中，玻尔提议：如果电子轨道运动的动能被限制在正比于其环绕频率上，那么，原子将会是稳定的。至于比例常数，他选择一个接近普朗克常数的量。在这一点上，玻尔关注力学稳定性，而非电磁学稳定性。

在曼彻斯特备忘录中，玻尔涉及电子位形、分子以及原子体积，但未涉及光谱线。“我全然未涉及对应于可见光谱线的频率的计算问题。”他在1913年1月31日致卢瑟福的信中把他的理论同尼可尔逊的理论相对比。（Bohr 1963, XXX vii）以后不久，哥本



哈根一位同事问他如何把他的思想跟氢原子谱线的巴尔末公式联系起来，使他大吃一惊，他竟然一直不知或忘却了这公式。这个问题打开了眼界，玻尔立即意识到他的观念能够扩展到对于分立谱线给出的一种说明。他的伟大论文分三部分发表在1913年夏与秋的《哲学杂志》上。氢原子是第一部分的焦点，在其中他引入了他的著名假设，即：（1）定态的概念，在定态中，通常力学有效，但电磁学无效；（2）关于当原子在不同定态之间跃迁时发射和吸收辐射的假设，这种跃迁过程不能被力学理解；玻尔指出：“但为了说明实验事实看来是必然的。”更瞩目地，受普朗克理论的激励，玻尔假设光的频率（ ν ）不直接相关于轨道电子的频率，而由两定态之间的能量差公式 $E_i - E_j = h\nu$ 给出。从这些基本假设玻尔得以导出氢原子频率的、物理学导论教程中所熟悉的巴尔末公式。这推导不仅再现了一个已知的经验定律，而且产生了用自然界的微观物理常数——电子电荷、质量和普朗克常数——表达的里德堡常数表达式，玻尔的结果是： $\nu = Rc(1/n^2 - 1/m^2)$ ，其中 $R = 2Z^2\pi^2me^4/h^3$ ， n 与 m 是表征定态的量子数， Z 是核电荷，1是对氢而言。在1913年夏跟公式吻合的谱线系， $n=2$ （巴尔末系）和 $n=3$ （帕森系）是已知的；玻尔预言存在对应于 $n=1$ 和 n 大于4的更多的谱线。“分别在极端紫外和极端红外的线系不可观察，但可期待它们的存在。”当铁多尔·里曼于1914年报道跟 $n=1$ 一致的谱线系时，玻尔的信念得到了证实。在其基态中（ $n=1$ ），氢原子的电离势可直接从巴尔末公式得到。玻尔得到一个约13伏的值，它与J·J·汤姆孙的实验估值11伏相近。（后来更精确的测量结果，与玻尔的值完全一致。）氢原子基态的半径，后来称为玻尔半径，为0.55埃，这是原子尺度的恰当标志。

或许，玻尔单电子原子理论给人印象最深刻的是他显示了：在星光谱中发现的、通常被归结于氢的“皮克林线”，实际

上应归因于单电荷的氦离子。这些谱线满足类巴尔末表达式 $\nu = R [1/2^2 - 1/(m + 1/2)^2]$ ，如果它们是氢引起的，那么它就会跟玻尔相矛盾。按照玻尔理论，半量子的态是不允许的。玻尔简单地把表达式重新写成 $\nu = 4R[1/4^2 - 1/(2m + 1)^2]$ ，并把它归于 He^+ ，就把威胁化作了胜利。他的关于皮克林线必定出现于充有纯氦的放电管中的预言，很快就被分光镜专家所确证。可是，测得的波长跟玻尔预言的波长的一致不是很理想；而按照阿尔弗雷德·弗勒，一位英国的分光镜专家的观点，细微的差异足以质疑理论的有效性。玻尔的答复发表在 1913 年秋的《自然》上，它是哲学家 I·拉卡托斯所谓的怪人调整——把反例转变为正例——的另一个光辉典范。玻尔指出： R 表达式中的 m 实际上是折合质量 $mM/(m + M)$ ，这里 M 是核的质量；有了这个修正，差异就消失了。

玻尔推导巴尔末公式不止一个方法，包括后来应用的所谓对应性原理。玻尔注意到：对于大量子数来说，发射一个量子的前与后的旋转频率之间是无差别的。“而按照通常的电动力学，我们应该期待辐射频率与旋转频率之比也接近于 1。”（Bohr 1963, 13）1913 年 11 月在哥本哈根物理学会的一次演讲中，玻尔强调：虽然，经典旋转频率与量子理论上的频率一般没有联系，“然而，在一点上，我们期待跟通常概念形成一种联系，即：基于经典电动力学计算慢电磁振子辐射，是可能的。”（Jammer 1966, 110）这是对对应原理的萌芽，它将在原子论的后期发展中及其变换为量子力学中发挥轴心作用（参阅第十一章）。

玻尔理论不只是单电子原子的一种理论，他还有大得多的雄心。在三部曲中的第二和第三部中，玻尔把他的理论应用于比氢大的化学原子以及分子之中。他提出了较轻元素的电子布局，并相信他的模型为周期系提供了第一个可信赖的说明。此外，他把他的工作扩展到简单分子，把氢原子的共价键想象成两个电子在



两个氢核之间的同一轨道上旋转。这部分工作成就不大，影响也相对较小。然而，它仍然是值得注意的，因为，它是第一次为真实原子提供的、确定的原子模型。共价键证明是玻尔的原子量子论所不能及的。但是，各种指示表明：化学不久便归结为玻尔新物理学的一个分支。例如，玻尔计算了形成氢分子的热量是 60 千卡/摩尔，这跟伊尔文·朗缪尔实验测得的 130 千卡/摩尔定性而非定量一致。当朗缪尔后来把实验值矫正为 76 千卡/摩尔时，玻尔重新计算的理论值为 63 千卡/摩尔。看来，氢分子近乎被说明了；但是，离真实还很远呢。

玻尔理论的力量不是它的理论基础——对许多人来说，它是不可信的，甚至是古怪的——而是它在一个广大的现象领域中的实验确证。例如，1913~1914 年，年轻的英国物理学家亨利·莫斯利研究由不同元素发射的特征 X 射线时，发现频率的平方根正比于原子量。莫斯利的图表很快成为研究一个元素在周期表中位置的重要工具，它也成为玻尔理论的一个重要确认。莫斯利的 X 射线发射机制是以玻尔理论以及始于 1914 年的一系列工作为基础的，这些工作是由慕尼黑的沃尔特·科瑟尔作出的，它进一步说明了 X 射线谱跟理论充分一致。另一个重要确证是电子轰击汞蒸汽的实验，那是 1913~1916 年间，由詹姆斯·弗朗克和嘎斯塔夫·赫兹作出的。1925 年，这两位物理学家因证实玻尔假说，使之转变为如卡尔·阿森在其斯德哥尔摩的授奖演说中所表达的“实验证实的事实”而获得诺贝尔奖。弗朗克和赫兹刚开始时原本不把他们的实验关联于玻尔理论，他们认为他们的实验不可能被该理论说明。弗朗克和赫兹的测量值他们信以为是电离电位达到 4.9 伏。但是，1915 年玻尔认为他们错误地解释了其实验结果，被测的根本不是电离电位，而是汞原子定态之间的能量差。只是在玻尔的解释之后，弗朗克和赫兹才意识到他们意外地为玻尔的原子理论提供了强大的支持。

迈克耳孙和爱德华·莫利于 1887 年显示了氢原子的红线有个双线结构。虽然到 1913 年，已有几次测到了精细结构分裂。玻尔似乎一直没留意到这现象，所以，在他的理论中没有为它留下余地。但是，一次明显的反常又一次转变为一次证实，虽然这一次要求理论作一个大的扩充。这扩充是阿诺尔德·索末菲尔德在慕尼黑作出的。他于 1915 ~ 1916 年间把狭义相对论引入到玻尔原子的力学之中。这样，他将理论导致双量子原子，其中电子的轨道是用一个主量子数、一个轴量子数以及一个依赖于双量子数的能量表达式所描述的。按照索末菲尔德更精细的理论，存在比玻尔理论中更多的定态。索末菲尔德导出精细结构的一个值，1916 年被图宾根大学的帕逊的实验所完全确认。理论与实验的明显一致被认为是玻尔-索末菲尔德理论的伟大成功。其实，理论与实验之间的关系是相当模糊的，因为，理论只允许频率计算，不允许强度计算；然而，虽它的成功被德国一些物理学家所质疑，但对于大多数物理学家来说，索末菲尔德-玻尔的工作看来像是对玻尔关于原子的量子理论的令人瞩目的确认。

第五章 | 量子理论的缓慢崛起

黑体辐射

量子理论起源于热辐射的研究，特别源于罗伯特·基尔霍夫于1859~1860年首次定义的“黑体辐射”。按照基尔霍夫的定义，理想黑体是吸收一切入射辐射的物体；发射的能量将独立于物体的本性，仅依赖于其温度。奥地利物理学家约瑟夫·斯忒藩1879年提出基尔霍夫的理想热辐射的能量随绝对温度的四次幂而变化。5年后，他的提议获得他的同胞路德维希·玻尔兹曼的理论证明。玻尔兹曼把热力学第二定律同麦克斯韦的电动力学相结合，证明了 $u = \delta T^4$ ，其中 u 是总能量密度， δ 是个常数。这条称为斯忒藩-玻尔兹曼定律的黑体辐射第一定律，有助于使人们直接注意到理论与实验物理学的一个新领域。辐射的谱分布是斯忒藩-玻尔兹曼定律所未言及的问题，它很快以一个主要的和广泛讨论的形式浮出水面。1897年，威廉·维恩迈出解决这个问题的重要一步，他证明：如果在一个温度下黑体辐射谱为已知，那么，就可导出任何其他温度下的谱分布。分布函数 $u(\lambda, T)$ 不直接依赖于 T 和波长 λ ，而是以某函数 $\phi(\lambda T)$ 的形式依赖于波长与 λT ，即如 $u(\lambda T) = \lambda^{-5} \phi(\lambda T)$ 。维恩位移定律——因为它

蕴含：当 T 增加时，函数的峰将向较小波长方向移动——被发现跟实验极好地吻合。函数被认为具有普适意义，但其具体形式及其含义无人知晓。1896 年，维恩发现了一个可能的解决方案，那就是 $\phi(\lambda T)$ 具有 $\exp(-\alpha/\lambda T)$ 的形式， α 是一个普适常数。维恩辐射定律似乎是正确的，没等到 1897 ~ 1899 年间在柏林实施的一系列精密实验的确认就被普遍接受了。虽然维恩定律看来是经验可信的，但它的理论基础却不能令人满意。就在这个地方，马克思·路德维希·普朗克，作为柏林大学物理教授而成为基尔霍夫的继承人，进入了舞台。

普朗克是一位热力学专家，对于热力学第二定律及其在物理与化学中的应用有着浓厚的兴趣。他在 19 世纪 90 年代的主要职业不是理论物理，而是化学热力学，他试图基于第二定律给它一个更严格的基础。在这工作中，熵和不可逆性概念是中心。普朗克研究纲领的核心是试图在严格的热力学基础上说明不可逆过程，就是说，不以玻尔兹曼的方式引入任何统计的或原子的假设。跟他的长辈奥地利物理学家相反，普朗克坚定地相信第二定律的绝对有效性，拒绝在熵和几率之间可能存在关系。1895 年，普朗克的推理使他考察热力学与电动力学之间的关系。他从电动力学的观点主攻不可逆性问题，主张辐射过程的不可逆性是麦克斯韦方程缺乏时间对称性所致。可是，电动力学的进路证明是不成功的。两年后玻尔兹曼证明电动力学——并不提供一个“时间箭头”——不比力学有更多的时间不对称性，这样，普朗克必须找到确定黑体辐射谱的另一条途径。普朗克重新努力的结果是：1897 年到 1900 年间，在《物理年鉴》上发表了 6 篇论不可逆的辐射过程的论文。在 1899 年，他发现了一个振子的熵表达式，利用它可导出维恩定律。这是普朗克所梦寐以求的，如果不是为了实验家们，他本来是可以就此打住的。就在普朗克导出维恩定律的同一年，跟普朗克和其他物理学家假定的相反，实验证明这



定律不是完全正确的。

在黑体辐射历史上以及在量子理论的诞生中，实验的重要性不亚于理论。大多数精密实验是在柏林的帝国物理与技术研究所进行的，在那里黑体辐射的精确谱线不单纯具有纯学术意义。它被认为会是有利于德国的照明工业和热力工业的知识，这些产业拥有帝国的最大顾客。1899年，奥托·鲁梅和恩斯特·普林汉姆实施的实验表明：对于长波，维恩定律是不正确的。海利希·鲁本斯和费迪纳德·克尔鲍姆的进一步实验发表于1900年秋，对于“维恩定律”只近似正确地提供了确定的证明（见图5.1）。按照这一定律，对于很小的 $\nu/T = c/\lambda T$ 值，辐射能密度 $u(\nu, T)$ 会趋于零；而鲁本斯和克尔鲍姆的实验表明 $u(\nu, T)$ 趋于 T 。新的实验测量产生了几条新的经验定律，但它们对于理论家不具有重要意义。普朗克最关注的，不在于找到一条正确的经验定律，而在于从第一原理导出它来。他现在被迫重新考虑他的工作。他意识到他原先推导维恩定律时一定有错，但错在哪里呢？如何从物理学基本原理导出一条分布定律来，使得它对于 ν/T 的大值满足维恩定律，但对于其小值不导致 T ？普朗克的重新考虑很快引导他为一个振子的熵假设一个新表达式，尽管这没有清晰的理论辩词。关于这个表达式，一直被正确评价，“在物理学史上从来没有这样一个不显眼的数学补充会具有如此大效果的物理和哲学推论。”（Jammer 1966, 18）

利用他关于熵的新表达式，普朗克得以导出他认为的维恩定律的一个改进版本。新的分布定律——普朗克辐射定律，仍缺乏能量子的概念——是于1900年10月19日在柏林科学院的一次聚会上宣布的。按照这个黑体辐射定律的第一个正式版本，谱的能量密度以 ν^3 除以 $\exp(\beta\nu/T) - 1$ 而变化。这定律似乎跟实验资料完全一致，在这方面，它是人们长久以来寻觅的答案。可是，由于新定律基于一个不太激起灵感的熵表达式，它不是令人满意

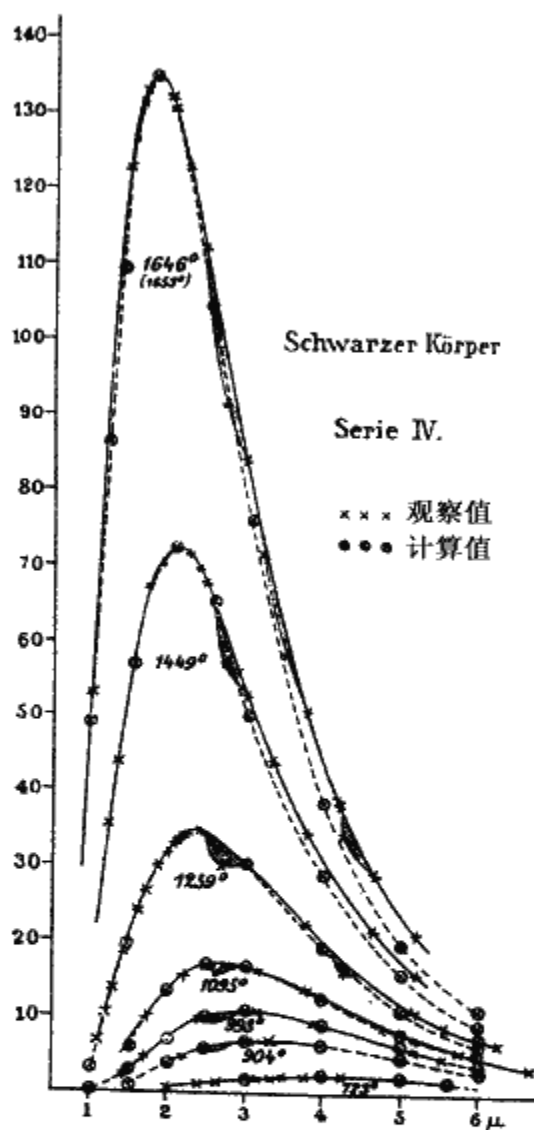


图 5.1 不同温度下的黑体辐射谱，由鲁梅和普林汉姆于 1899 年 11 月测得。对于 λT 的大值，被测曲线（连续线）位于理论曲线（虚线）的上方，表明维恩定律的不合适性。来源：Kangro 1976, 176.

的，所以，普朗克继续考虑如何使此公式表达更为完美。在没有找到充分表达新定律的公式之前，他是不会满意的。

在他试图获得一种令人满意的理解的过程中，普朗克意识到他必须引入一种新进路，即把玻尔兹曼的熵概念转换成分子混沌



的表达式。这并不意味着普朗克向玻尔兹曼关于熵和不可逆性观念屈服。他把他的攻击新思路放在著名的“玻尔兹曼方程” $S = k \log W$ 上，这里 k 是玻尔兹曼常数， W 是分子无序的一个组合表达式。其实，这个表达式不是玻尔兹曼的，以这种形式仅出现于普朗克的著作之中；而且，第一个作为自然界的重要常数引入“玻尔兹曼常数”的人是普朗克。为了求得 W ，普朗克引入他称之为能量元素的东西，即假设一个黑体的全部振子的总能量（ E ）分成能量 ε 的有限等份。用普朗克的话来说：“我考虑 E ……是由一个完全确定数目的有限相等部分组成的，而为此目的，我用到自然常数 $h = 6.55 \times 10^{-27}$ （尔格秒）。这常数再乘以公共的共振频率，便给出以尔格为单位的能量元素 ε ，而 E 除以 ε 就是分布在 N 共振子上的能量原子数 P 。”（Darrigol 1992, 68）普朗克在1900年12月14日柏林科学院的另一次聚会上报告了这个新的推导。这一天通常被称为量子理论的誕生日，因为，回头来看，这是量子假设第一次被提出。可是，普朗克并不真正理解能量元素是作为能量量子化而引入的，即振子能量只能取离散值。他一点也不突出量子不连续性，而把 $\varepsilon = h\nu$ 视为没有物理实在背景的一条数学假设。他相信它是理论的权宜之计，在最后的表述中会被删除。

下面是普朗克1931年致美国物理学家罗伯特·伍德的信，看他怎样描述他达到辐射定律的途径的：

总之，所发生的一切可简单地描述为一种绝望的行动……当时，我被辐射与物质的平衡不成功问题折磨了6年，我知道那问题对于物理学具有基本的重要性。我也知道那个表达能量关于简正谱分布的公式。因此，必须找到一种理论解释，不论付出多高的代价……维持两条热力学定律不变的新进路敞开着……在我看来，它们

是在一切境况下都必须被维持的。至于其他，我准备牺牲我原先信以为是物理定律的任何一条。玻尔兹曼曾说明热力学平衡是怎样利用统计平衡建立起来的，而如果这一进路应用于物质与辐射的平衡，人们就会发现：如果一开始就假设能量被迫一起维持在一定的量子状态，那么，就可阻止能量连续地耗散于辐射。这是一条纯形式假设，我真的不把它想得太多；除非我必须有个积极的结果，不论代价如何。（Hermann 1971, 23）

对于普朗克和他同时代的人来说，量子非连续性一开始就被认为是一个不值得严重关注的特点，被关注的倒是新辐射定律的令人瞩目的、被后来许多实验确认的精确性，以及它包含了斯忒藩-玻尔兹曼定律、维恩位移定律和在大 ν/T 值的极限中的维恩辐射定律。普朗克强调寓于其定律之中的自然常数，并用它导出 k , N （阿伏伽德罗数）和 e （基本电荷）的数值。从黑体测量他可找到 k 因子 $k = R/N$, R 是气体常数, N 是推得的数；此外，从 $e = F/N$, 可找到 e , F 是由电解可得到的法拉第常数。普朗克的数值确定法，大大地优越于当时由其他方法得到的粗糙估值。

1900 年 12 月普朗克没有认识到新的辐射定律是以经典物理学的失效为先决条件的，别的物理学家也没有这种认识。值得注意的是普朗克辐射定律不含“紫外灾难”。这灾难的基础是：当经典平衡定理应用于黑体振子时，会导致形如 $\nu^2 T$ 的能量密度，从而当对一切频率积分时，达到一个无穷大的总能量。在这意义上，经典物理学与黑体辐射之间存在冲突，但在导致普朗克假设的实际过程中，这个冲突根本未起作用。所提到的辐射定律由瑞利勋爵于 1900 年夏获得。虽然他为了使公式更好地跟实验一致，附加了一个特设因子 $\exp(-\alpha\nu/T)$ 。今天称为瑞利-金斯定律公式的 $u \approx \nu^2 T$ ，是因为它于 1905 年被瑞利重新推导，并在同一年被



金斯补充了一个数值修正。虽然鲁本斯和克尔鲍姆在他们 1900 年的论文中包含了瑞利的公式，普朗克没有理睬它和配分定理。没有指数因子的瑞利-金斯定律显然对于高频是错误的，但对于经典物理学来说，这差别不认为是一个大问题。当时，包括瑞利和金斯在内的许多物理学家都怀疑配分定理的普遍有效性。

早期关于量子假设的讨论

如果物理学在 1900 年 12 月发生了一次革命，似乎谁都没有觉察到，至少普朗克全然没有。在 20 世纪的头 5 年里，量子假设几乎是完全寂寞无声的，它多少被包含在普朗克关于黑体辐射定律的推导中。但是，这条定律本身被迅速地采用，因其跟实验令人信服地一致。早在 1902 年，普朗克的辐射公式就出现在汉利希·凯瑟的权威读本《分光镜教程》第二册上，但丝毫未提及量子假设的本性。虽然偶有批评，但到了 1908 年，普朗克的理论已作为对于黑体谱问题的正确回答被普遍接受。只有少数的物理学家认为，值得深入普朗克计算的细节，弄清楚这公式为何是正确的。

这少数当中的一位是亨利克·A·洛伦兹。1903 年，他开始专注于黑体理论，基于他的电子论独立推导了瑞利-金斯定律。这结果使他迷惑。5 年后，在罗马的一次大会上，他鸟瞰了黑体问题，或者，用他的话说，有重量的物质和以太之间能量的区分。如洛伦兹所看到的，选择在两者之间：一方面，理论上令人满意但经验上却不合适的瑞利-金斯-洛伦兹公式；另一方面，经验上确认但理论上不满意的普朗克公式。值得注意的是，他偏爱于第一种选择，模糊地提出：为了在两个竞争者之间做出抉择，需要新的实验。德国实验家们非常了解，由于深信物质已经尘埃落定了，他们无意瑞利-金斯定律，反对洛伦兹的提议。结果是：

洛伦兹被迫接受普朗克的理论，并试图理解其真实意义。认识到普朗克理论包含某种非经典特征，洛伦兹便以新量子理论的领导人之一的面貌出现了。

由于洛伦兹的罗马讲座，经典瑞利-金斯定律的“灾变推论”在物理学共同体中变得较为熟悉了；只是从那时起，“紫外灾变”在讨论中开始起主要作用。（这个词汇是1911年由埃伦费斯特引入的，在教科书中成为一个通俗的论题。）由于电子理论是当时主宰的和成功的微观理论，人们受其影响，相信它多少能够解决黑体问题的迷惑。这就是洛伦兹1903年所试图做的事，用瑞利-金斯定律终止它的作用。有一段时期，普朗克追逐这样的观念，即电量的量子可能导致能量量子。例如，1905年他致保尔·埃伦费斯特的信中写道：“在我看来，这个假说（存在电量的基本量子）提供存在基本能量量子 h 的一道桥梁，似乎是不可能的，特别因为 h 具有跟 e^2/c 一样的量纲。”（Kuhn 1978, 132）这里我们不妨假定，它隐含着精确结构常数 $2\pi e^2/hc$ 的第一个暗示。可是，没有新东西从这观念产生出来，也没有什么从其他试图由已存理论推导作用量子的努力中产生出来。然而，普朗克对于自然常数的浓厚兴趣以及它们之间可能的相互关联值得注意。在1899年的一篇论文——普朗克常数隐含于其中，他注意到，所有通常的单位系都是基于“我们文化的特别需要”，并提出另一种单位系，它是以对应于常数 h 、 c 和 G 的东西为基础的。他写道：这样的单位系会“独立于特别的物体和物质，必然对于一切时间和一切文化，甚至外在于地球和外在于人类的东西，保持其意义”。普朗克提出的单位没有特别的价值，长期被人忽略。可是，随着20世纪70年代量子引力的问世，它们开始被广泛讨论，而且，在20世纪转折的今天，普朗克质量（ 10^{-5} 克）和普朗克时间（ 10^{-43} 秒）是宇宙理论中的重要量（参阅第二十七章）。

在十年的大多数时间里，普朗克相信：他的辐射定律可能同



经典力学和电动力学调和起来；非连续性是原子振子的特征，能量交换没有这样的特征。他认识到这涉及某种量子化，但那不是指单个振子的能量被限制于离散集 $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, ……之中。在他的早期论文中，他把能量方程写成 $E = nh\nu$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)，但 E 意指振子的总能量，它并不要求单个振子能量是如此限定的。只是约到了 1908 年，部分由于跟洛伦兹通讯的结果，他的观点转变为：作用量子是一种超越经典物理学理解的不可约现象。直到那时，他把 $h\nu$ 视为能量媒体的最小部分而不是某种可自身存在的东西，一种类似于电量量子和电子的能量量子。正如 1909 年他致洛伦兹的信所写的，他现在采纳这样的假设：“电子与自由以太之间的能量交换只以量子的整数倍发生。” (Kuhn 1978, 199)

在 20 世纪 10 年代末，量子理论仍不能被很好地理解，只被少数理论物理学家认真地研究。这些人包括洛伦兹、埃伦费斯特、金斯、爱因斯坦、拉摩，以及普朗克。爱因斯坦在 1906 年已独立认识到普朗克理论的根本的、非经典的本性。而 4 年后，大多数专家才承认能量量子化是实在的，而这必然要求对于经典物理学的某种突破。在头十年里，量子理论基本上等同于黑体辐射理论，这个小领域对物理学共同体没有太大的冲击。图 5.2 给出了 1905 ~ 1914 年间发表量子论文的作者的作者数。在那以前——即从 1900 年到 1904 年——有关量子理论的作者数是 0 或 1（这仅有的一位就是 1900 年和 1901 年的普朗克）。这图不仅显示了量子理论的缓慢起飞，也显示了 1910 年以前黑体物理学在比热方面发表物中的主宰地位；约从 1913 年起，原子和分子物理学开始改变量子理论的成分和步伐。

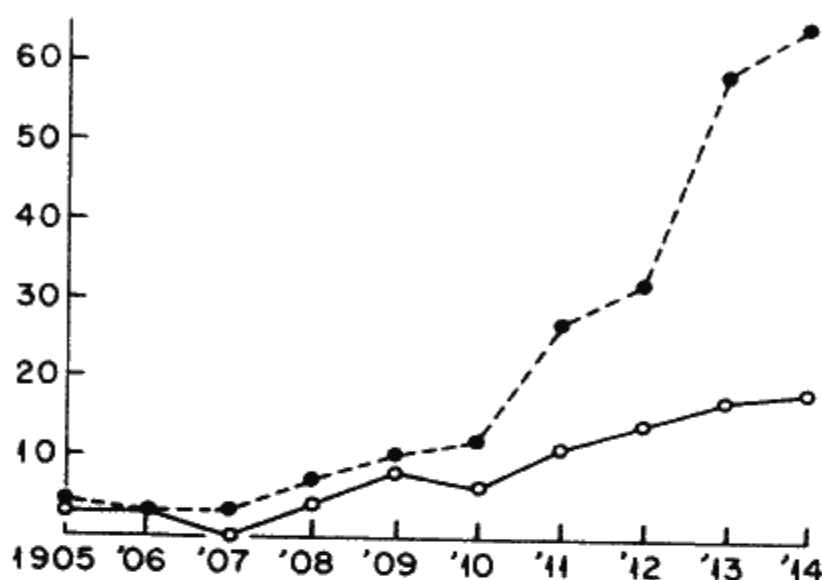


图 5.2 量子理论的缓慢崛起。黑饼表示发表量子论题的作者人数。空圈表示涉及黑体理论（早期量子物理学的子领域）的作者人数。来源：T. S. Kuhn, *Black-Body theory and Quantum Discontinuity*.

爱因斯坦与光子

据称即使普朗克没有发现他的开创早期量子理论的黑体辐射公式，在 20 世纪的第一个十年里，科学界也会达到这个理论。这个量子理论的假想发明者的候选人就是爱因斯坦，当然他是以发明相对论而著称的。年轻的爱因斯坦也对具有如此重大意义的早期量子理论作出过贡献——并且是在 1905 年，他引入相对论的同一年——因而，这一宣称是有道理的。其实，爱因斯坦似乎考虑过他的量子论甚至比他的稍后在狭义相对论方面的工作更重要。在 1905 年 5 月致他朋友康拉德·哈比齐特的一封信中，他说他已写成的论文中“辐射与光的能量性质”是“很革命的”。而关于准备中的论狭义相对论的论文，他则较谦虚地说成是“带电



体的电动力学和关于时间概念的一种修正的用法”。虽然，如众所周知的，普朗克已变成违心的革命者；但是，爱因斯坦尤其清楚地认识到量子假说的革命性蕴涵，并志愿按量子革命的预言家行事。我们说量子理论只是由于爱因斯坦的工作在 1905 年才切实地开始，是更加符合历史真实的。

那么，爱因斯坦自称对辐射的、发表在 1905 年 6 月 9 日《物理年鉴》上的革命性工作是什么呢？首先，爱因斯坦的进路跟普朗克的大相径庭，全然不依赖于普朗克的辐射定律及其相关的作用量子。爱因斯坦确实提到该定律，但没有用它；取而代之的是，他关注于在其经验证实的领域内（对应于高频与低温）的旧维恩定律。爱因斯坦清楚地说明，这是谱线的有趣而可疑的部分，是一个要求新物理假说的部分。爱因斯坦强调：经典理论会导致瑞利-金斯定律，而且，他很容易地导出了该定律，包含前方有个 $\nu^3 T$ 的修正因子。从优先的观点，这定律可称为爱因斯坦或瑞利-爱因斯坦辐射定律（或者，对于物质，如果更累赘地，瑞利-洛伦兹-爱因斯坦-金斯定律）。可是，爱因斯坦 1905 年工作所关注的焦点是维恩定律。利用简单而聪慧的热力学论据，并充分运用玻尔兹曼的几率理论（熵的表达式 $S = k \log W$ ），他计算了一个容器内的整个辐射被局限于总容积中一小部分时的几率。类比于经典气体，从这结果他推断“低密度的单色辐射的行为——就维恩辐射公式有效而言……俨如它是由互相独立的、大小为 $R\beta\nu/N$ 的能量量子所组成。”这就是说，按照爱因斯坦理论，辐射本身就有一个离散的或原子的结构，一条远远超越普朗克所提议的假说。注意到：符号 β 表示 h/k ，如普朗克在其引入量子化假说之前，以及在 1900 年 12 月的作用量子中所用到的。爱因斯坦既没有用普朗克的记号，也没有用他更成熟的黑体辐射理论，不是偶然的。当时，爱因斯坦就相信普朗克的理论不可能弄得跟光量子观念一致，这个错误他在 1906 年的一篇论文中给予

了纠正。由于 $k = R/N$ 和 $\beta = h/k$ ，我们有辐射量子的通常公式 $E = h\nu$ 。

爱因斯坦清醒地意识到，他的关于自由辐射由离散的量子或如它们被命名的光子所组成的“启发观点”的根本本性。（这名字是美国化学家吉尔伯特·列维斯于1926年提议的。）毕竟，光的波动理论有着给人印象深刻的论据，所以，爱因斯坦强调：他的光量子概念是暂时的。然而，他深信光量子的实在性，并渴望证明他的假说是富有经验成果的。特别地，把光电效应视为一种能量交换的过程，在其中，电子从被光照射的金属表面上释放出来，他得以说明1902年被菲力普·勒纳德所做的实验。此外，从爱因斯坦理论可直接得到产生光电子的最大能量（ E ）必须线性相关于入射光的频率。爱因斯坦的方程是 $E = h\nu - P$ ，其中 P 是依赖于阳极金属的功函数。在当时，勒纳德和其他人谁也没有测得 E 是 ν 的函数，因此，爱因斯坦的光电方程是一个真正崭新的预言。爱因斯坦理论不是对于一个不能被经典理论说明的反常实验的反应，因为，1905年光电效应不被视作是有问题的。那只是在几年之后，实验家们才提出 E 和 ν 之间的关系问题。而当他们这样做时，目的不是检验爱因斯坦的理论。

就所涉实验资料而言，它们在几年里显得混乱和不一致，从二次型经对数型到线性关系（即从 $E \approx \nu^2$ 经 $E \approx \log \nu$ 到 $E \approx \nu$ ）。只在约1914年证据才偏向于线性定律积累，并由于罗伯特·密立根著名的1916年系列实验，终于在舆论获得一致。

无疑，现在确立了发射电子的最大能量的确是随光频率线性变化的，正如1905年爱因斯坦所预料的。人们或许以为它必定会被视为爱因斯坦理论的一个伟大成功，并使大多数物理学家接受光量子假说。如此断言，那就错了。没有一位实验家终结于赞扬爱因斯坦的“勇敢，别说那是无冒险的假说”，如密立根1916年如此说。密立根所确认的是爱因斯坦的方程而不是他的理论，



而且，在理论与实验之间不存在一一对应关系。无需光量子假说也可能导出一个实验确认的方程。而当这些或多或少经典（并且是特设）的做法证明站不住脚时，则有可能宣称当时光电效应尚未被说明。这就是所发生的事态。爱因斯坦的光电效应既被实验家也被理论家所忽视或拒绝。它只是极端根本的一项假说。在1913年爱因斯坦被提议为有声望的普鲁士（或柏林）科学院院士时，普朗克和沃尔特·能斯脱等举荐人称赞爱因斯坦，但他们也提及“他可能有时犯在猜测中打不中目标的错误，例如，如他的光-量子假说。”（Jammer 1966, 44）

不顾对于光量子的冷漠反应，爱因斯坦继续研究量子理论。这是1906~1911年间他所专注的主要领域，具有比相对论更重要的意义。在1909年的一篇论文中，爱因斯坦导出了黑体辐射的能量涨落。他的公式包含两项：一项他追溯到辐射的量子-微粒本性，另一项他解释为一个经典波项。所以，在爱因斯坦的观点中，电磁辐射包含有传统上被视为矛盾的两个特色。1909年爱因斯坦的波与粒子融合的理论，完全是权宜之计，但在继后工作中，他发展了这个思想，并在1925年使之成为量子力学的一个完整部分。爱因斯坦1909年工作的另一个方面也值得一提，那就是：他把动量涨落同能量涨落一并考虑，而且，在1909年爱因斯坦把光量子想象成一个粒子，正如电子、原子是粒子一样。可是，虽然光量子的动量（ $p = h\nu/c$ ）直接来自于相对性理论，只在1916年他才写下这个表达式。

比热容与1913年量子理论的地位

正如爱因斯坦是将量子理论的意义扩展到辐射领域的第一人，他也是把它扩展到后来为人熟知的固态物理学问题的第一人。这是他1907年做的事，当时他把量子理论用于计算固体的

比热容。从1819年起人们就知道：固体元素的原子量与它们的热容量之间存在一种特殊的关系，即（用现代的话来说）摩尔热容量大约是个常数，约为6.4卡路里/摩尔·度。在1876年按其法国发明者命名的杜隆-珀蒂（Dulong-Petit）定律，得到了玻尔兹曼的坚实理论说明。他证明从力学物理的均分定理可得到该定律。虽然普遍认为这是物质的力学原子观的一个巨大胜利，但这成功是不完全的。对于杜隆-珀蒂定律有少数例外，诸如碳（金刚石）、硼和硅。碳的反常从1841年就为人所知，实验表明：比热随温度增加；而在金刚石情形中，这现象尤为显著。1875年获知金刚石在从 -100°C 到 $+1000^{\circ}\text{C}$ 的域内增加15个因子；并且，后来由苏格兰化学家詹姆斯·杜瓦于1905年发表的实验表明：在温度降到20K左右时，比热容几乎消失。试图说明这种变化的种种努力都失败了。所以，在爱因斯坦之前，比热容问题仍然是个谜；而他却成功地攻克了它。

在其1907年的工作中，利用普朗克分布定律，爱因斯坦找到了以相同频率在三个方向振动的晶体中一个原子的平均能量的表达式。这个表达式给出高温下的经典值 $3kT$ ，从而导致杜隆-珀蒂定律；但随 T 趋于0而指数地衰减。在这区域内，经典配分定律——杜隆-珀蒂定律的基础——不能应用。把他的比热容公式跟韦伯所得到的资料相对比，爱因斯坦得到与所做的实验相一致（如果不是理想的话）的振动频率，然而，那只是近似的。显然，新实验的结论是在低温变化中所得值与理论不符，还需要作修正。爱因斯坦理论的更精细版本，是1912年被丹麦理论家彼特·德拜发展的。它给出的值跟实验十分密切地一致。

比热容理论有助于把量子理论带到物理学的更传统的领域中来，引起那些对它不关注或不理解黑体辐射细节的诸多物理学家的注意。在这方面，它远比光量子理论更重要。可是，它的影响不是即时的。事实上，直到1910~1911年间，爱因斯坦的比热容



理论在科学文献中仍未提及，就同他的光量子理论的处境一样。只在那时物理学家才开始注意到该理论，并且，相当突然地，比热的量子理论变为公认的主要论题。1913 年在这方面发表的文献，多于论黑体理论的文献。当时，量子理论仍然是物理学一个相当深奥的领域，但它现在被越来越多的物理学家认真对待了。此外，在化学中也感觉到它的存在。德国物理化学的先驱沃尔特·能斯脱，在激起人们对量子理论的关注中起着传媒作用。普朗克以及黑体辐射的其他学生只关注辐射领域，并把该领域独立于物质结构视为一个优点；跟他们不一样，对沃尔特·能斯脱来说，量子力学是重要的，因为它有助于理解物质结构。他在低温领域的化学热力学的工作支持爱因斯坦关于比热的理论。1911 年沃尔特·能斯脱提议该理论也可应用于气体分子的振动，这思想被一个在柏林沃尔特·能斯脱实验室工作的丹麦化学家尼尔斯·布杰尔鲁姆所采用。在 1911 ~ 1914 年期间的工作中，布杰尔鲁姆把量子理论应用于气体比热以及分子谱线的红外吸收上。特别地，1912 年他把双原子分子的旋转能量量子化，并借此结果提出一个很快获得实验确认的、关于分子谱的理论。布杰尔鲁姆的工作，是对后来称为化学物理领域的早期贡献，是量子理论的一个重要成就。在 20 世纪的头 10 年里，对于传播量子理论来说，分子比原子更重要。

1911 年 11 月在布鲁塞尔召开的索尔维物理大会说明了人们对于量子理论兴趣的增长。这是一个重要的国际物理学系列聚会的第一次。埃尔斯特·索尔维，比利时的工业家和慈善家，因发明苏打的新生产方法赚了一笔钱；他对理论物理有着浓厚的兴趣。索尔维的赞助与能斯脱倡议的结合导致了 1911 年的索尔维大会，它专事于量子理论、气体分子运动理论和辐射理论之间的疑难关系。洛伦兹主持大会；21 位应邀与会者是欧洲物理学的精英，包括普朗克、能斯脱、索末菲、德拜、居里、卢瑟福、

庞加莱和爱因斯坦，美国人没有应邀。虽然布鲁塞尔的讨论对于所提出的问题没有产生确定的解答，它们却有利于使辐射和量子理论更尖锐地被给予关注。爱因斯坦发现大会“在某一方面，类似于耶路撒冷的废墟等候着的”——剂社会兴奋剂。“在布鲁塞尔最为有趣的，”他致他的朋友亨利西·詹格的信写道，“洛伦兹是智力与才能的奇才——一个活的艺术品。……庞加莱对相对论全然一盘否定。……普朗克对于一些无疑是错误的预想观点是不驯服的……对于残忍的耶稣会神甫来说，整个事情一直是欢天喜地的。”（Mehra 1975, xiv）受大会成功的激励，索尔维决定建立一个永久的机构，为此，他赞助 100 万比利时法郎。创立于 1912 年的国际物理机构，该机构由来自 5 个国家的 9 名杰出物理学家组成的委员会指导运作。第一届科学委员会由荷兰的洛伦兹和凯末林·昂尼斯，法国的玛丽·居里和马瑟尔·布里渊，丹麦的马丁·克鲁德逊，比利时的罗伯特·哥尔德什米德特，德国的能斯脱和埃米尔·瓦伯格，以及英国的卢瑟福等人组成。在 20 多年的时间里，索尔维大会是精英物理学家的、最具声望和科学意义的聚会。

1911 年的聚会最初由能斯脱组织。他认为专从量子理论角度讨论物质与辐射问题的时机已经成熟。主要由于爱因斯坦关于比热容的工作，能斯脱开始深信，他早期不太关注的量子理论现在具有革命的重要意义。在 1910 年 7 月，他致信给拟议中的大会赞助人索尔维：“似乎当前我们处于对于迄今被认为是物质运动理论的基础进行一次革命性重新表述的迷雾中。……[能量量子]这个概念对于原先被使用的运动方程是如此的陌生，致使它的被接受无疑会伴随一场关于我们基本直觉的广泛变革。”（Kuhn 1978, 215）能斯脱跟普朗克讨论过这个计划。普朗克同意量子理论是对经典物理学概念的一个严重挑战，但开始时对于 1911 年就召开这样的大会抱怀疑态度。1910 年 6 月他致信能斯脱，写



道：“我的意见是：你心中与会者的近乎一半会认为有理由来参加，因为他们对于〔理论〕迫切需要一种变革有一种主动的关注。至于上了年纪的人（瑞利、范德瓦尔斯、舒斯特、西里格），我将不详细讨论他们是否对事情感兴趣。但是，即使在年轻人中，这些问题的紧迫性和重要性几乎不被承认。在你所提名的所有人中，我相信除了我们自己，只有爱因斯坦、洛伦兹、W·维恩和拉摩才对问题真正有兴趣。”（Mehra 1975, 5）虽然，论“辐射理论与量子”的布鲁塞尔大会囊括了量子理论的所有特征，并非所有与会者都关心量子理论。由简·佩兰与克鲁德逊给出的两报告就不涉及量子理论。大会报告的标题给人的印象：所涉主题在理论物理的所选择领域中是重要的：

- 能量均分定理在辐射中的应用（H·W·洛伦兹，年龄 58）
- 按照麦克斯韦和玻尔兹曼比热容的动理论（J·H·金斯，年龄 34）
- 黑体辐射定律和基本作用量子假说（M·普朗克，年龄 53）
- 动理论和理想气体的性质（M·克鲁德逊，年龄 40）
- 分子实在性的证明（J·佩兰，年龄 41）
- 量子理论运用于生理化学问题（W·能斯脱，年龄 47）
- 作用量子和非周期分子现象（A·索末菲尔德，年龄 42）
- 比热容问题（A·爱因斯坦，年龄 32）

索尔维会议并未产生重要的新洞见，但会议的报告与讨论有助于对什么是量子理论的关键问题建立一种共识。一般的态度是

谨慎的和有点怀疑的。人们认识到量子之谜远未被解开，量子理论的地位仍是不能令人满意的。“ h -疾病看来更加无望了，”大会后不久爱因斯坦致洛伦兹的信这样写道。同一时期，他在另一封信中得出结论：“实际上谁也不知道任何事情。”（Barkan 1993, 68）然而，少数专家承认量子理论的基础已经奠定，它标志着物理学史上新的篇章的开始。这感觉是保守的普朗克于1911年致德国化学学会的一封信中所表达的：“确实，大多数工作有待去做，”普朗克说，“但已经开了头：量子假说绝不会从世界上消失。……我不认为我是走得太远了，如果我说，由于这一假说，建构一种理论的基础已经奠定，这理论总有一天注定要以一种新眼光，流入分子世界的瞬变而精细的事件之中。”（Klein 1966, 302）

普朗克在1911~1914年间的努力，可以说明量子理论事务的状态。他试图尽可能多地保留电动力学的经典理论来复兴该理论。他的新倡议是放弃振子的能量量子化，即能量的吸收与发射不是离散的过程。取而代之，他提议：吸收是一个连续过程；发射则不是连续的，它受一个几率定律的限制。在此基础上，普朗克以他自认为更满意的方式，导出了黑体辐射定律。跟1900年原来理论的版本相反，在其1911年的版本中，一个振子的能量在0摄氏度时并不消失。对于 $T=0$ ，结果是 $E=h\nu/2$ ，它被命名为零点能。这个惊人的观念激起了很多关注，并被应用于各种现象之中，包括放射性、超导性和X射线的散射。能斯脱甚至在宇宙猜测中使用了这一观念。零点能的存在最终被确认，以自然的方式从20世纪20年代的量子力学中推导出来。追溯它的历史渊源，它起源于普朗克1912年的误断。

第六章 | 低温物理学

向零的赛跑

低温学物理是关于超低温度下的现象与物质的性质的学问，特别研究产生如此温度的方法。1880 年左右，低温物理学还是一门处于婴儿期的科学。在整个 19 世纪期间，人们一直关注气体的凝聚，尤其是空气成分的液化。在这一领域，第一个重要的结果发生于 1877 年，当时一位法国矿山工程师，路易斯·开勒忒特，在巴黎科学院的一次聚会上宣布，他观察到液氧的液滴。这一发现是科学史上的一个双重事件，因为在开勒忒特宣布的前两天，一名瑞士物理学家诺尔·皮克忒克给科学院发来电报，称成功地获得了凝聚氧。这是科学史上许多同时独立的发现之一。两位研究者采用不同的方法，但都是对纯氧减压，然后突然让其膨胀。在成功制造氧凝聚之后数日开勒忒特对大气的另一成分——氮，重复了他的成功。

1883 年波兰科学家 S·乌诺布列斯基和卡罗尔·奥尔泽乌斯基生产了较大量的液态氧（几毫升）。他们修改了开勒忒特方法使之无须气体的突然膨胀。化学家乌诺布列斯基和奥尔泽乌斯基在克莱考的杰基朗尼亚大学工作。那里是 19 世纪末低温学研究

的世界中心之一。(乌诺布列斯基 1888 年在其实验室的一场大火中悲惨丧身。) 在早期实验报告中, 最低温度约为 55 K, 常压下低于氧的沸点 35 K。可是, 第一代低温物理学家所使用的方法是低效而不可靠的, 不足以生产较大量的液化气体。19 世纪 90 年代主要由于德国的卡尔·冯林德, 英国的威廉·汉姆普逊和法国的乔治·克劳德发展了新的制冷技术, 情况有了改变。林德是制冷工程的先驱和一家成功公司的奠基人, 这公司发展了工业用的电冰箱。1895 年林德 75 岁时, 基于焦耳-汤姆孙效应, 他发明了气体液化的一种有效力的方法。林德、汉姆普逊和克劳德的工作主要目的是生产工业用途的液化气, 但它对于进一步的科学探究也很重要。例如, 创立于 1909 年的国际制冷学会, 就是一个包括低温科学与低温工业的机构。早期低温学的另一个特点是学科的交叉性, 容纳了化学家、物理学家和工程师。第三个特点是, 按当时实验物理学的标准, 它是很昂贵的。只有极少的物理实验室才能提供低温物理研究。

在 19 世纪末, 人们有越来越多的兴趣追求实现更低的温度, 尽可能地接近绝对零度。氢的液化, 据信, 具有一切气体的最低沸点, 遂成为低温物理的一个具有诱惑力的目标。气体的液化不久就发展为一场竞赛。竞赛的主要参加者是英国(伦敦)、波兰(克莱考)、荷兰(莱顿)的科学家。竞赛是在争争吵吵中进行的, 由于竞争的压力以及声望, 先是在液氢继而在液氦上争优先权, 过早宣布成功, 不一而足。苏格兰化学家詹姆斯·杜瓦可称得上比赛中的一个人物。他在伦敦皇家研究所工作, 在家中既从事化学又从事实验物理学。从 1874 年起, 他就考察低温物理。1892 年他发明了一个最有用的低温装置, 真空低温恒温器, 或杜瓦瓶——或者, 不太科学的术语, 保温瓶。1898 年利用修正了的林德方法, 杜瓦在他的对手失败的地方获得了成功。他努力的结果是得到 20 毫升的沸腾液氢。他估计的温度是 20 K。获得液氢



之后他进而生产固态氢，1899 年获得了成功。于是达到了氢的三相点（三相处于平衡），但其温度不可直接测定。杜瓦估计是 16 K，但在他的实验中或许达到了更低的温度，仅高出绝对温度 12 K。杜瓦暗自跟克莱考的奥尔泽乌斯基和莱顿的凯末林·昂尼斯竞争。在获得液化氢的胜利之后，竞赛的下一个目标为氮的液化。

当时，氮元素是很新的。虽然它的名字和存在早在 1868 年当诺曼·罗克耶把太阳光谱中一条未知线解释为一种新元素时就被提出，只是在 1895 年，威廉·拉姆齐在地球资源中发现了氮。如化学家克列门斯·温克勒 1897 年所说，原先以为它属“稀有元素之列”。几年之后，1903 年在美国的天然气井内发现氮很丰富，但花了几年的时光才把萃取氮所需的技术发展到一个商业的水平。从 1915 年每立方米氮的价格 2500 美元，到 1926 年价格降到每立方米 3 美分。在 20 世纪的早期年代，氮既稀少又昂贵，科学家猜测它的三相点低于氧的三相点，因此，低温物理学家致力于液化氮的事业，杜瓦、奥尔泽乌斯基和凯末林·昂尼斯之间的竞争，新加入了拉姆齐及其助手莫利斯·特拉夫斯。拉姆齐和特拉夫斯是世界惰性气体专家，但不幸的是他们跟脾气大的杜瓦不讲话。液化氮的第一次努力是早在 1896 年由奥尔泽乌斯基做出的，失败了；杜瓦和特拉夫斯接着干。这些实验是试探性实验，就是说实验进行时不知需要多低的温度，只是到了 1907 年，估计可信赖的氮的临界温度是在 5~6 K。它略低于欧洲低温学中心当时能获得的最低温度，所以成功似乎近在咫尺了。

当凯末林·昂尼斯在 1908 年 7 月洋洋得意地令杜瓦极懊悔地宣布他液化了该气体时，英国和波兰的物理学家被击败了。这实验开始于 7 月 10 日上午 5:45，用了 75 升液态空气来凝聚 25 升氮，后者再用来在减压下液化 60 毫升氮。氮的第一次液化是 13 小时后。凯末林·昂尼斯如此描述成功高潮：“那是美妙的时刻，

当液体被第一次看到时，它看来就是无质地的。……当我可以向我的朋友范德瓦尔斯显示液氮时，我是喜出望外的，他的理论一直是引导我液化成功的向导。”（Dahl 1984, 2）凯末林·昂尼斯立即开始下一步的靠减压蒸发试图使氮固态化的试验。他失败了，进一步的努力也没有成功。固态氮最后于1924年被莱顿实验室的威廉·吉瑟姆获得。凯末林·昂尼斯依然继续生产液氮，并且在这过程中达到了一个新的低温记录，1910年得到的温度低于1 K。在此阶段当证明技术上不可能进一步把温度降低时，他停了下来，决定去考察在新近的1~6 K的温度区间获得的物质的性质。

凯末林·昂尼斯和莱顿实验室

海克·凯末林·昂尼斯，从1882年起直到1922年退休止是莱顿实验室的主任和无可争辩的领导人。他于19世纪70年代初在海德堡大学的克基霍夫指导下开始其物理学的研究生涯。他的莱顿大学实验物理的教授席位在荷兰是同行中的第一。1893年前后，他参与低温学的一个大研究课题，不久实验室的大多数工作就集中在低温上。（但不是全部，1896年塞曼就是在这里发现磁场对谱线的作用。）凯末林·昂尼斯以其处理行政事务的管理才能系统地规划了长期的研究纲领。他的实验室是第一流物理学大科研机构的范例之一。跟伦琴、卢瑟福或居里的传统实验室不同，凯末林·昂尼斯把他的部门转变为一个有效运作与投资优良的科学工厂，那里的技术专家和组织专家是最富有科学想象力的。凯末林·昂尼斯不靠国产的成件仪器，而是引进外国技术与专家组织一所仪器和玻璃的培训学校。

莱顿的专业组织有大量的经济支持，这些支持的保证部分来自于主任对丹麦工业家的私人贡献。这样的专业组织使它优越于



克莱考、伦敦和巴黎的竞争者。1906年，实验室运作一台有效力的氮液化机，每小时能生产4升液态氮；在1908年以后的10多年里，它垄断了液态氮的生产。只在世界大战之后，别的地方才开始生产液态氮，首先在多伦多大学，然后在华盛顿的国家标准局以及柏林的帝国物理技术研究所。即使在那时，莱顿仍然是世界首屈一指的低温物理中心。对莱顿实验室来说，氮（当时仍然是稀有的和昂贵的）的供应具有至关重要的意义。凯末林·昂尼斯把来自于北卡罗来纳的放射性独居石矿砂加热，然后从释放出来的气体中获得其第一批氮。这种珍贵气体的其他供应渠道则由外国化学公司的赠品方钍石——另一种放射性矿石，演绎而来。

凯末林·昂尼斯是一位旧式有阶级意识、极为保守的、专制的领导人。如丹麦物理学家、菲力普研究室后来的主任亨德里克·克什米尔所描述的，他像个“慈善的暴君”一样运转着实验室。这个暴君是和善的、能激起其科学和技术员工的许诺与合作精神。为了确保实验室的广泛沟通，1885年凯末林·昂尼斯创办了内部期刊《莱顿物理实验室通讯》，论文多以英文发表，很少用法文和德文。这些论文通常是原先在《皇家学会进展》（阿姆斯特丹）发表的论文的译文或校正稿，以及常常是国外期刊的重印稿。不论他是否直接参与，凯末林·昂尼斯认为那是他的权利，即作为研究室主任，他应该以作者与合著者身份出现在实验室流通的出版物上——这一政策可以说明他的科学论文的惊人产出率的原因。

由于莱顿实验室崛起成为世界低温物理的领导中心，他吸引了越来越多的、想利用一流设备的访问者。一旦有现象需要在极低温条件下考察，莱顿就是首选之地。仅举几例：在新世纪的头几年里，玛丽·居里就在莱顿实验室做实验，检验放射性物质的半衰期是否被极冷温度所影响。（皮埃尔·居里考察了同一课题，但是在伦敦与杜瓦一道。）1908年，巴黎来的吉恩·贝克勒尔在

温度低到 14 K 时考察磁光现象，发现在氦液中的实验支持他关于正电子的有争议假说。贝克勒尔（以及爱自动署名的凯末林·昂尼斯）得出结论：“液氦中的观察似乎为支持正中子的存在提供了强有力的证据。”（Kragh 1989, 217）这一次凯末林·昂尼斯或许为他的自动署名感到遗憾。“强有力的证据”并不被倾向于接受正电子存在的其他物理学家所接受。

莱顿实验室不仅有其特有的建筑物、仪器和组织机构，而且，有其特有的由其主任的科学观演绎而来的方法论。定量而精确的测量被给予极大的强调，尽管这些被认为是科学的本质；理论和定性的观察被认为是次要的。1882 年，在其就职莱顿大学的讲演中，凯末林·昂尼斯表达他的信条如下：“按照我的观点，建立现象之间的关系是为了定量考察，它应居于物理学家的实验实践中的首位。我想在每一个物理实验室的入口处写下一条格言：测量通达知识。”（Casimir 1983, 160）这个态度是莱顿精神的一部分，当然是凯末林·昂尼斯与其身边许多科学家所共有的。对于定量测量的强调，是世纪之交物理学的一个特征性特点。德国物理学家弗里德利希·科劳什，一名物理研究所的重要组织者和有影响力的教程的作者，被誉为“实验物理学的旗手”。按照他的观点，测量是物理学的核心。1900 年他宣布：“测量自然是我们时代特征性活动之一。”（Cahan 1989, 129）贝克勒尔和凯末林·昂尼斯的态度在实验家之间广为传播，或者在分光镜专家中间特别流行。例如 1907 年诺贝尔委员会在授奖给迈克耳孙时最清楚地表达的：“至于物理学，它作为一门精密科学以这样的方式令人瞩目地发展着，我们可以宣称物理学绝大多数最伟大的发现极大地依赖于在物理研究的测量中所得到的精确度。[测量的精确度] 是我们更深地穿透到物理定律中去的、具有根本性的实质条件——我们通达新发现的唯一途径。”（Holton 1988, 295）

高精度测量的偏好并不必然否认理论或观察的价值。在某些



情形中，实验可以视为自我辩白；但在其他情形中，它们被视为服务于发现、增加对自然的理解等较高目的。在世纪之交，常有人争辩：精确的测量会导致定量的新现象，并以此方式提供一种由量到质的辩证变换（利用一个经典的马克思相）。这就是诺贝尔委员会在授奖给予迈克耳孙时所暗示的，它对于这位美国物理学家肯定不是一个陌生的概念。在1902年一篇对物理学基本定律和未来发现的可能性的评论中，他写道：“一直发现这些定律的许多明显例外，当观察被推至极限时，情况特别如此。就是说，一旦情况如此，就可以考察极限情况。”在提到某些这类例子之后，迈克耳孙继续写道：“还可引用其他例子，但是这些足以证实这样的提法：‘我们未来的发现必定是寻找第六位小数。’由此可知，测量中提供精确度的每一个手段都是未来发现的一个可能因素。”（Michelson 1902, 24）这就是所谓的“第六位小数的罗曼蒂克”，即相信或希望：如果科学家对自然的领域的精确认知已达某一范畴，那么，观察稍大范围的能力的每一次提升可产生戏剧性的新结果。如果科学家稍加精细地——更精确、更高能量、更低温度、更高分辨率，从而付出更高代价——继续做他们的实验，那么，那将会得到巨大的回报。自然，在这过程中，没有自动机，不保证增加实验精确度或扩大实验范围必然导致发现。但是，迈克耳孙的观点肯定有其事实根据——即他受到科学史的支持。后来的物理学继续提供偏爱第六位小数罗曼蒂克的证据。迈克耳孙清楚地看到他的以太漂移实验是属于这一类，按照他的思想这实验导致了相对性理论。1911年超导的发现或许是更平凡的例子。

莱顿测量通达知识的哲学一直被称作“复杂的现象论”，应该把它同粗糙的经验论区别开来，后者用实验取代，而不是补充理论工作。尽管它对于精确实验的强调，凯末林·昂尼斯的研究纲领远远不是跟理论无关的。表面上可能着魔于征服新的低温

域，其实那不仅仅出于简单的好奇，或者，领先于其竞争者宣布占领一个未知领地（虽然这些因素起着作用）。跟迈克耳孙和其他头等实验家不同，凯末林·昂尼斯受过坚实的数学训练，且深深被洛伦兹、范德瓦尔斯等丹麦理论家所激励。在开始其低温学大纲领之前，他已从事热力学和分子物理学的工作，而且，特别对检验范德瓦尔斯分子理论的推论感兴趣。1982年范德瓦尔斯表述了“对应态定律”，第二年凯末林·昂尼斯独立地发展了这定律。按照这定律，所有物质当它们的压强、温度和体积均用这些变量在临界点时之值表达时，遵从相同的状态方程。1894年凯末林·昂尼斯清楚地阐述了他参与气体液化纲领的理论基础：“我是从关于范德瓦尔斯的对应定律的研究中被引导到凝聚气体的工作之中的。追究恒稳气体，特别是氢气，在极低温下的等温线，似乎是我渴望要做的事。”（Gavroglu and Coudaroulis 1989, 51）在他成功地获得液氢之后，相同的信息，莱顿低温实验与范德瓦尔斯之间的密切关系，包含在1908年凯末林·昂尼斯已被引用的陈述之中。

超导性

莱顿实验室对金属的导电率这一性质进行考察。当时，一般公认的理论是基于一本法国物理学家保尔·德鲁德于1900年发表的著作——今天大学教科书讲的大体是相同的理论。德鲁德提出金属导电是自由电子在外电场影响下运动的结果，而电子（原来他认为携带正电荷与负电荷）的性质就像气体一样。在金属中，导电电子被认为跟离子与中性原子处于热平衡之中。为简单起见，假设所有电子具有相同的热运动速度 u ，而 u 是远大于漂移速度的。德鲁德导出电导率（反比于电阻）的表达式为 $\sigma = e^2 n \lambda T^{-1}$ 。这里， λ 是平均自由程， n 是单位体积的电子数。1905



年，洛伦兹用麦克斯韦-玻尔兹曼的电子速度分布取代不现实的等速电子假说，发展了一个较复杂的理论。然而，经冗长的计算，他得到一个公式，仅跟德鲁德公式相差一个因子。电导理论被J·J·汤姆孙、欧文·理查逊、尼尔斯·玻尔和其他人发展成更为复杂的一些版本。从1910年到1915年，这些版本中金属导体的电子被想象成满足理想气体定律的气体或汽体。于是，人们希望找到电子与金属原子相互作用的一种机制以用来说明黑体辐射定律。可是，没有找到令人满意的答案，而且，电子理论在精确说明电阻随温度变化方面也没有更多的成功。

实验得知：纯金属的电阻正比于绝对温度变化，即， $\sigma \approx T^{-1}$ ，至少在低于20 K时。这里出现了一个问题，因为只有武断地假设 $n\lambda \approx T^{-1}$ ，它才跟德鲁德-洛伦兹公式一致，而德鲁德理论或它的后续理论都不可能计算出 n 和 λ 是 T 的函数关系。此外，在世纪之初的头十年里，极低温实验即不跟 T^{-1} 关系一致，又不跟 T^{-1} 关系一致。杜瓦和其他人关于在氢沸点附近电阻的温度依赖性考察表明：电阻在低温下为一种平坦趋势。这隐含两种可能性：电阻趋近于一个非零值，或者，它将达到一个极小值，然后在低温下不确定地增加。后一种可能性广泛地被认为跟理论很好地一致。接近零度，自由电子被认为“冻结”，凝聚地附在原子上；于是，自由电子密度会趋于零，而按照德鲁德-洛伦兹公式，电阻将戏剧地增加。凯末林·昂尼斯属于发现这是一个有诱惑力的假说的前列。1904年他作了如下描述：

看来，充满于金属空间的电子汽体似乎越来越凝聚在原子上。于是，如开尔文所首先表述的，电导性在极低温度下达到某极大值，然后再减小，直至达到绝对零度。此时，金属全然不导电，不会比玻璃更好。电导率的峰值温度或许低于液氢电导率的若干倍。在更低的温

度下，就不残留任何电子了，电活动如我们所知的被冻结在金属之中。(Dahl 1984, 6)

用新近生产的大量液氮作装备，1910年凯末林·昂尼斯决定系统地考察这个问题。实验是跟科尼利斯·多斯曼和吉勒斯·霍尔斯特合作进行的，进行测量的是霍尔斯特，论文的作者只有凯末林·昂尼斯一人。这个丹麦人首先是用一个铂电阻，把它的数数据跟早先关于已知纯度的金电阻测量进行比较。凯末林·昂尼斯报告所得到的结果：“看来，降到液氮温度时电阻继续减少，但当达到这些温度时，电阻是个常数值，跟被带入的具体温度无关。”(Dahl 1984, 6)他意识到，甚至微量杂质也可能大大地影响结果；并相信这些掩盖了电阻随温度的真实变化。观察到含金丰富的样品比别的样品显示较低的电阻，他提出，纯金属的电阻会随温度趋于零时渐近趋于零，实际上在5 K时就为零了。这是一个大胆的猜测。可是，像大多数大胆猜测一样，它是错的。

1911年新的实验是用水银做的；水银可获得极高的纯度。4月的初始报道似乎确认了凯末林·昂尼斯关于电阻渐近消失的猜想。但在第二个月作更精确的实验时，显示出一个出人意料的变化：当温度接近4.2 K时，电阻突然降至零（图6.1）。在他获1913年诺贝尔奖的演说中，凯末林·昂尼斯描述了这次发现：“实验无疑表明，就所能达到的实验精度而言，电阻消失了。可是，未预料的事情也同时冒出来了：电阻的消失不是逐步而是突然发生的，电阻从4.2 K下的五百分之一降到百万分之一。可以确立，最低温度1.5 K时的电阻小于常温电阻的十亿分之一。这样，4.2 K的水银进入了一种新的状态，由于其特别的电性质，可称之为超导态。”1911~1913年的进一步实验证明：水银的超导性维持不变；铂和金却未显示类似行为。可是，水银不是例外；1912年12月证明锡和铅也是超导体。进一步实验证明电阻的消



失温度是：锡 3.78 K；铅 6.0 K。与预计的相反，人们认识到：杂质对新现象没有影响。其次，虽然电阻突然消失的现象已经一再被确切地证实，人们仍然心存疑窦，怀疑这种曲线的“膝状”是实验的人为因素造成的。

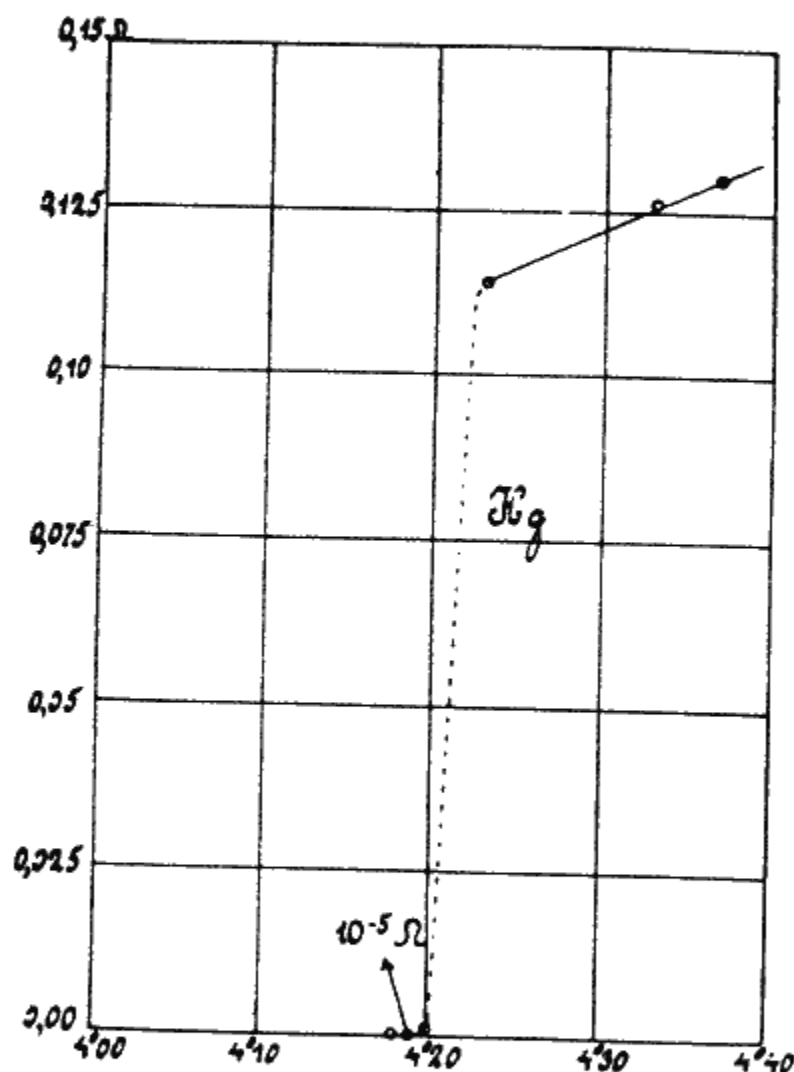


图 6.1 超导性：1911 年凯末林·昂尼斯揭示的水银电阻对温度的关系

“超导性”一词首先出现于 1913 年早期凯末林·昂尼斯写的一篇论文中。虽然针对这种困惑现象现在有了一个新名词，对这

名词所涵盖内容的理解却仍是一片空白。有一段时间，凯末林·昂尼斯并未充分意识现象的新颖性，继续把它想象为正常导电的一种极端情况，即继续停留在德鲁德-洛伦兹理论的构架内。他想，它或许是由电子平均自由程突然增加引起的。这种想法连同铅和锡的实验结果，使他相信：超导性可能是一切金属的一种普适低温态。但这显然是要靠实验决定的问题。在低温超导领域内，迅速取得了进展，尽管缺乏理论理解。1913年凯末林·昂尼斯和他的团队开始了一项强磁场对超导态的影响的研究。一种新的不连续性冒出水面，那就是：场存在一定的临界值；高出此值，零电阻突然神秘地消失。临界场强发现随温度的减小而增加。这样，超临界磁场的效应具有加热金属相同的效应。这一新颖现象仍然令理论家感到困惑。

有称凯末林·昂尼斯在1911年就发现了超流性一说。该说法的基础相当微弱：莱顿小组测量了液氦密度随温度的变化，结果提示最大密度在2.2 K附近。可是，密度的锐利变化——氦超流性的一种显示——只在1924年第一次世界大战之后几年才牢固地确立。即使在那时，凯末林·昂尼斯也不把它视为一个特别有趣、值得详细研究的现象。对于发现来说，观察是一个必要的而不是充分的条件。到了1938年，超流性才达到可被称为发现的水平。

虽然超导性的发现是莱顿实验室工作的光辉顶峰。它只是一个广泛研究规划纲领中的一个部分。在以前和1911年之后，凯末林·昂尼斯和他的小组花去大部分时间用于考察包括霍尔效应、压电效应、居里定律、磁光和放射性在内的其他性质。凯末林·昂尼斯被授予1913年诺贝尔奖，是为了“他对低温物质性质的考察，这考察特别导致液氦的生产”。在授奖演讲中并没有提及超导性是当年的头等重大发现。超导性没有立即激起狂飙，也反映在1911年第一次索尔维大会上，大会期正好是这一发现



后的半年之内。在布鲁塞尔，凯末林·昂尼斯详细报告了电阻测量，暧昧地提出电阻的消失可能要用量子理论来说明。在他的诺贝尔讲演中，他同样提出了超导性可能跟“普朗克振子的能量”有关。在索尔维报告后的简短讨论局限于与保尔·朗之万的一个问题，这表明集中在布鲁塞尔的物理学家们对这现象不是特别感兴趣。在1911年之后，迅速兴起了一股浪潮，试图用量子理论来发展一种关于电导的改进理论，从而说明超导性。在这些改进理论中，较为突出的学说是威廉·维恩于1913年提出的。他基于这样的假设：电导实质上是由电子的平均自由程确定的。维恩的量子理论导致电阻对温度的二次型依赖关系，不能用来说明超导电阻的突然下降。量子理论的其他作用，由吉瑟姆1914年和弗雷德里克·林德曼1915年提出，但也好不了多少。什么是电阻突降的原因呢？为什么这现象只局限于周期表中的个别金属呢？理论无可奉告。然而，尽管失败了，因为是反常，所以没有危机感。

如果超导性不能被理论理解，它或许能被技术利用。在早期阶段，莱顿物理学家想到了建造高功效的超导电磁铁的可能性。这种电磁铁不仅具有科学意义，而且，在电技术工业上大有用场，那里即使对于大电流也无热损失。

可是，证明强磁场反抗超导性；因此，超电磁铁的美梦不得不搁置，至少暂时的。1914年早期，实验是用一个超导铅环做的，对它施加强度高到千高斯的变化磁场。在小磁场下电阻是零。但在约600高斯的一个临界值处，电阻戏剧性地升起，类似于电阻-温度关系。凯末林·昂尼斯写道：“电阻增加……效果俨如磁场的引入就像加热导体一样。”由于第一次世界大战到来，莱顿的氦供应被暂时卡断；没有液氦，别说超导性，就连温度低于5K的其他现象也不能进行实验研究。所以，电阻与磁场之间的进一步考察不得不等到20世纪20年代。

在大战结束后，氦的新供应得到了保障，莱顿的低温实验得以继续进行。1919年又有两种金属铊和铀被确认是超导体。它们的电阻消失温度是：铊 2.32 K，铀 7.2 K。在理论方面，为理解现象的努力在继续，但进度异常的缓慢。战后前两次索尔维大会可以说明关于超导性知识的不能令人满意的状态。在 1921 年大会上，凯末林·昂尼斯作了论“超导体与卢瑟福-玻尔模型”的报告，在其中他报道了最新的莱顿实验。他提出超导性是一种非经典现象，只能用玻尔的量子原子来理解，但凯末林·昂尼斯或其他人都讲不出所以然来。他把他的报告概括成八个问题，包括“既然卢瑟福-玻尔原子联合成一种金属，它们的电子发生了什么呢？它们失去了其动能的全部或部分吗？”

1924 年第四次大会的主题是“金属的电传导”。在这里，几个与会者讨论了超导性。洛伦兹谈金属的电子理论，暧昧地得出结论：电子在超导态中的轨道必定是不规则的或“特别的”。凯末林·昂尼斯根据玻尔关于周期系的新理论讨论了个别超导元素的电子结构。朗之万提出：电阻的不连续消失可能是物质相变的一种结果。他显然没有意识到这个提议在莱顿被实验检验过。在那里，吉瑟姆的 X 射线分析证明超导性不涉及相变。欧文·理查逊提出了一个模型，按照这模型电子可沿彼此相切的轨道自由运动。奥古斯特·皮卡德则怀疑闪电可能是常温下的超导现象。

在说明超导性问题上，索尔维讨论也好，同时代为理解超导性的其他努力也好，都没有比战前迈进半步。1922 年爱因斯坦在为部关于超导性文献撰稿时写道：“由于我们对于组合系统的量子力学广泛无知，我们远远不能从这些模糊观念中编辑出一个理论来，我们只能依赖于实验。”（Dahl 1992，106）顺便一提，这可能是“量子力学”这个词汇第一次出现在一篇科学出版物中。

当量子力学的无知域在 1925 年后急剧地狭窄化时，对于超



导性理论的理解证明不能以简单的方式从量子的新理论产生出来。最终超导性被给予一种令人满意的量子力学解释，但它经历了一个漫长的阶段和多次失败的努力才达到对奇异现象的充分理解。1935 年弗里兹·伦敦和海因兹·伦敦两兄弟发展了一个唯象理论。1957 年超导性以宏观基础被美国人约翰·巴丁、里昂·库珀和罗伯特·施里弗所最后说明。我们将在第 24 章看到这个后来的发展。

第七章 | 爱因斯坦相对论及其他

洛伦兹变换

相对性理论植根于 19 世纪光学。由于奥格斯汀·菲涅尔的光波理论的成功，物体在以太中运动的问题成为人们关注的焦点。按照菲涅尔 1818 年提出的一个理论，物体的穿透运动会部分地带动以太。在这种情形中，以速度 v 相对以太运动的物体，因拖曳光而改变速度中一个依赖于 v/c 的因子。这里 c 是光在真空中的速度。菲涅尔理论说明了后来大量的光学实验。它们表明：检测地球在以太中的速度至 v/c 的第一级，是不可能的。当光的以太理论被麦克斯韦的电磁理论取代时，情况是一样的。运动体的任何电磁学理论必须包含这个“菲涅尔拖曳”。在其于 1892 年发表的麦克斯韦理论的第一个电子论版本中，洛伦兹把菲涅尔拖曳解释为运动物体中光与电荷（“离子”，后来的电子）相互作用的一种结果。可是，洛伦兹关注的是他的理论不能说明美国物理学家阿尔伯特·迈克耳孙和他的合作者爱德华·莫雷 5 年前做的、迈克耳孙于 1881 年首次做过的一个实验。

著名的 1887 年迈克耳孙-莫雷实验是试图利用一种先进的干涉仪测量地球相对于以太的速度。这实验是在美国俄亥俄州的克



利夫兰市应用科学学院实施的。迈克耳孙是那里的物理教授。没有指望会检验出一级效应，但迈克耳孙-莫雷实验可精确到依赖于微量 $(v/c)^2$ 的二级。按照洛伦兹理论，以太的拖曳效应应在这级精度中被检验出来，但连地球相对于世界以太的运动也检测不到，这个结果使理论家和实验家们大吃一惊。有一段时间，迈克耳孙甚至不承认这一结果，认为这次实验是一次失败。他坚持：“由于原先的实验是否定的，问题仍要求一种解答。”（Holton 1988, 284）理论与实验之间的不一致引起洛伦兹用后来称之为洛伦兹收缩的假设来修改他的理论。这就是：相对地球运动方向，物体的长度收缩一个因子 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ ，或者，收缩 $\beta = v/c$ 的二级， $1 - \beta^2/2$ 。量 γ 称为洛伦兹因子。洛伦兹不知道，一个类似的说明曾于 1889 年被爱尔兰物理学家乔治·菲兹杰拉德提出，但没有公式。为此，有时把它称为菲兹杰拉德-洛伦兹收缩。菲兹杰拉德和洛伦兹两人都假设：假说中的收缩是由于分子力的变化引起的，但当时，他们谁也没有为这假说提供证明。

洛伦兹对迈克耳孙结果的说明显然是特设的，甚至不是以他的电动力学为基础的。在接下来的 10 年里，他极大地发展了该理论，并且，1899 年，这个荷兰人通过从一个相对于以太运动的坐标与相对以太静止的坐标之间的变换推导出长度的收缩。1904 年洛伦兹以更完全的形式写出这些变换，其形式跟我们现在知道的一样。可是，他不是首先在文献中完成的“洛伦兹变换”的人。作为一个纯数学变换，早在 1889 年，由沃尔德马·沃依格特发表的一本论多普勒效应的著作中就可以找到它的原型。此外，1900 年拉摩从他自己的电子论中导出了这些方程。利用洛伦兹-拉摩变换，迈克耳孙-莫雷实验的零结果可容易地得到解释。事实上，它来自于洛伦兹理论，根据这理论通过以太的匀速运动不可能有可检验的效应，不仅对于 v/c 的二级，而且对于一切级别。

洛伦兹变换构成了狭义相对论的形式核心。乍一看，似乎爱因斯坦的理论是以洛伦兹-拉摩的电子理论为先导的。可是，情况根本不是这样的。尽管得到如1905年爱因斯坦一样的变换，洛伦兹-拉摩变换却是以完全不同的方式说明它们的。首先，洛伦兹的理论是一个动力学理论，在其中变换可委归于一种物理原因，即以太与运动物体中的电子的相互作用。长度的收缩被视为由于物体通过以太运动所引起的一种补偿效应。按照洛伦兹理论，地球真实地穿越以太而运动，只是根据迈克耳孙的结果才知以太风不可测量。其次，洛伦兹将以太作为他理论的实质部分，起着绝对参照系的作用。例如，他坚持（1904年隐含地和1906年明确地）绝对同时性的存在。这一概念并不跟时间变换的现代解释相一致，只是说明了洛伦兹和爱因斯坦理论之间的区别。在这两个理论中，变换式 $t' = \gamma(t - vx/c^2)$ ，这里 t' 是以速度 v 相对于参照系 (x, t) 运动的参照系中的时间。但洛伦兹把变换视为一种数学机制，且“当地时” t' 没有实际意义。他想只有真实时间 t （他称之为一般的时间）才有实际意义。另一方面，洛伦兹并没有得到速度相加的相对论公式，而在相对论的构架内，那是直接来自于运动变换的。

虽然洛伦兹、拉摩和其他物理学家执着于以太以及相应的绝对空间和绝对时间概念，但还是有不同声音的。厄恩斯特·马赫强烈地批判牛顿的绝对空间概念，而且，他基于哲学的批判是众所周知的，影响的不仅仅只是年轻的爱因斯坦。马赫也批判了牛顿的绝对时间的观念（如他之前其他人做的）。他宣称绝对时间是形而上学，因为它不是建立在实验或直觉基础上的。马赫在其1889年的著作《力学科学》中力陈此观点。爱因斯坦在他的自传笔记中回忆道：“当我还是一名学生的时候，在这方面这本书对我产生了深刻的影响。”（Schilpp 1949, 21）

相对论的前期历史，不论如何粗糙，不能不提到洛伦兹之外



的亨利·庞加莱。基于在科学概念上他一向墨守成规，约于1900年这位法国数学家质问两个事件的同时性能否被给予任何客观意义。早在1898年他写道：“光具有一个绝对的速度。……这个假定不可能被经验证实……提供了定义同时性的一条新规则。”（Cao 1997, 64）两年后，在物理学的巴黎大会上，庞加莱质疑以太是否真实存在，虽然并未正面否定这个问题。他的观点是，以太顶多是一个抽象的参照系，不可能被赋予物理性质。在他1902年的《科学与假说》一书中，庞加莱宣称以太问题是形而上学，只是一种方便的假说，总有一天被视为无用而被摒弃。在他1904年向圣路易大会的讲话中，他批判性地考察了绝对运动的观念，认为洛伦兹时间（ t' ）不会比他的一般时间（ t ）不真实，并且，表述了他所谓的相对性原理，即检验绝对的、均匀运动的不可能性。他的1904年表述值得引录：“按照相对性原理，物理现象的定律对于一个‘固定的’观察者必定是跟对于相对他做均匀运动的观察者一样的。……这里必定崛起一个全新的动力学，它将按没有速度可超过光速的规则被特征化。”（Sopka and Moyer 1986, 293）到此为止，庞加莱的质疑着眼点主要是纲领的和哲学的。在1905年夏，在不知道爱因斯坦已发表的论文的情况下，他发展了一个在许多方面超越了洛伦兹理论的电动力学理论。例如，他证明了速度相加的相对论定律，那是洛伦兹所没做的；他还给出了电荷密度的正确变换公式。除了重申相对性原理是“一条自然的一般定律”外，庞加莱修正了洛伦兹的分析，证明洛伦兹变换形成一个群，具有 $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ 是一个不变量的重要性质，就是说，在任何参照系中保持相同。他甚至注意到：如果引入想象的时间坐标 $\tau = ict$ ，这不变量可对称地写为 $x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2$ 。庞加莱理论是一个重要的改进，带有实实在在的相对性性质，但不是相对论。奇怪的是，这位法国数学家既不跟随他自己的重要洞见，又对爱因斯坦同时发展起来的相对论迟钝地漠视。

爱因斯坦相对论

当1905年6月26岁的阿尔伯特·爱因斯坦构建相对论时，他并不为物理学共同体所知晓。他递交给《物理学纪事》的论文有几个特点颇令人瞩目，与其后来作为革命性物理学著作十分不同。例如，它不含有参考文献，这样，理论的来路不明。这个问题一直被后来的史学家们所追究。爱因斯坦不太熟悉已有文献，完全独立地完成他的理论。他知道庞加莱的一些非专业著作和洛伦兹1895年的工作，但不知道洛伦兹（或拉摩）关于变换方程的推导。关于爱因斯坦论文的另一个困惑是，他并未提及迈克耳孙-莫利实验，或者，因该试验而发表的关于不能检验以太风的以及在涉及运动物体动力学的文献中常规讨论的其他光学实验。可是，有令人折服的论据表明：在他写论文的时候，爱因斯坦不仅意识到迈克耳孙-莫利实验，而且意识到该实验对他不具有特别的重要意义。他发展他的理论不止是为了说明一个实验困惑，而是更多地从普遍性的角度出发的对简单性和对称性的思考。这些思考源自他对麦克斯韦理论的深厚兴趣，以及深信在力学定律与支配电磁现象的定律之间不可能有原则的不同。在爱因斯坦通往相对论的道路上，思想实验比实际实验更重要。

更为不寻常的是，爱因斯坦论文的首要 and 关键部分是运动学而不是动力学。他始于两条假设：第一条假设是相对性原理，表述为“对于一切对力学方程很好成立的参照系，电动力学和光学的同样定律皆成立”；第二条假设是“光在真空空间总是以确定的、独立于发射体的运动状态的速度 c 传播。”至于以太，爱因斯坦大胆地作为多余物摒弃之。从这个公理基础出发，他进而考虑诸如长度、时间、速度和同时性等几个看似初等的概念。他的目的是澄清这些基本概念。利用很简单的论据，他首先证明同时



性不可能离开观察者的运动状态而独立地定义。其次，他把这洞识应用于证明：关于物体的绝对时间和绝对长度不存在一致的观念。他纯运动学地导出了一个静止参照系与另一个相对它均匀运动的参照系之间的（洛伦兹）变换。

跟洛伦兹和庞加莱不一样，爱因斯坦的公式是相关于真实的、物理可测的空间和时间的。一个参照系跟另一个参照系一样的真实。从运动方程导出速度相加公式、运动物体的收缩以及时间的膨胀，即时间间隔是相对于观察者的速度的。爱因斯坦变换后的时间跟任何时间一样真实。而且，在这方面跟洛伦兹的当地时间很不一样。两个速度 u 和 v 的相加给出最后的速度 $V = (u + v)/(1 + uv/c^2)$ 。爱因斯坦注意到，这意味着反直觉的结果，即光速是独立于光源速度的。

相对论的基础是在运动学部分中，更具体地是在两条假设中给出的。只是在论文的第二部分，爱因斯坦才点破了论文的题目“论运动物体的电动力学”。他推导了电场和磁场的变换式。按照爱因斯坦的推导，它们跟空间和时间一样是相对量。但是，虽然场量是相对于运动状态的，支配它们的定律则不是：爱因斯坦证明，麦克斯韦-洛伦兹方程在任何参照系中具有相同的形式。它们是相对论不变量。按照爱因斯坦理论，许多物理量对于物体的运动是相对的，但另一些量（诸如电荷和光速）以及物理学的基本定律则维持不变。为此，爱因斯坦原先偏向把他的理论称作“不变量的理论”，这名称本来可以防止许多误解。“相对论”的名字是1906年普朗克引入的，且很快就为人们所接受。具有讽刺意味的是，普朗克认为爱因斯坦理论的实质是它的绝对性而不是它的相对性特征。

1892年，洛伦兹假设了作用在一个在磁场中运动的电荷 q 上的力（洛伦兹力 $F = qv \times B/c$ ）。爱因斯坦保存这一定律，但改变了其地位。他得以从他的变换中以简单的方式导出它来，从而把

它归结为一条导出定律。在他的论文的结尾，爱因斯坦考虑运动电荷、电子以及它们的质量和能量。他的电子不同于同时代电动力学所考察的电子，因为他的电子是原始的量。他对于其形状或内部结构问题不感兴趣。他预言：一个电子的动能会随其速度按 $m_0 c^2 (\gamma - 1)$ 而变化，这里 m_0 是缓慢运动的电子质量，即静止质量。从这里只要往前迈一小步，就达到质量与能量的等价性。那是爱因斯坦在 1905 年另一篇论文中所做的工作。在那篇论文中，他推导了可能是物理学中最著名的定律 $E = mc^2$ 。用爱因斯坦的话说：“一个物体的质量是其能量内容的一种量度；如果能量改变 L ，则在相同意义中，质量改变 $L/9 \times 10^{20}$ ，能量以尔格量度，而质量则以克量度。”

爱因斯坦论文的大多数读者或许把它视为对于当时流行的电子论的一个贡献，而很少注意其运动学部分。但是，爱因斯坦不是电子理论家，他的理论跟其赖以建立的假设一致，完全着眼于普遍性。宣称这结果对于一切物质皆有效，不论它荷电与否。爱因斯坦指出他跟同时代人的区别，写道：他的结果虽从麦克斯韦-洛伦兹理论导出，“对于有质量的质点也是有效的，因为有质量的质点可被附加在一个电荷，不论如何小，而变成一个电子。”（Miller 1981, 330）这种“电子”在电磁世界观中是没有地位的。在 1905 年，质量与能量之间的等价性已是众所周知的，但被限制在较狭窄的电磁学解释的范围内（参阅第八章）。而爱因斯坦的 $E = mc^2$ 却完全是普遍意义上的。

爱因斯坦的理论相当迅速地被看重和讨论，特别在德国。可是，它的真正本性并未被立即承认，常常被认为是洛伦兹电子理论的一个改进版本，被以“洛伦兹-爱因斯坦理论”称谓，这个称谓甚至还出现在迟至 20 世纪 20 年代的文献之中。早期相对论的重要支持者是马克思·普朗克。他不仅以其权威支持相对论的推出，而且，还在技术上发展它。普朗克对爱因斯坦理论的逻辑



结构和统一特色有极深刻的印象。他承认它是一次兼容数学与电磁学的基础理论。1906年，他十分高兴地发现，相对论能用最小作用量原理呈现出来。普朗克按照爱因斯坦理论发展了粒子动力学，第一个写出了动量与能量的变换定律。另一个重要的拥护者是赫尔曼·闵可夫斯基。他在1907年的一个讲座中，在一种具有强烈形而上学诉求的四维几何学构架中推出相对论。闵可夫斯基引入了粒子世界线的概念，并且，热情地说明相对论对于过去的突破是何等的根本：“从此，空间本身和时间本身都注定凋谢成剩余影像，只有它们的联合才永葆独立的实在。”（Galison 1979, 97）可是，闵可夫斯基把爱因斯坦理论视为洛伦兹理论的一种完善和解释，错误地把它局限在电磁学世界观的构架内。

由于普朗克、麦克斯韦、埃伦费斯特、洛伦兹和其他人的工作，到1910年，爱因斯坦的相对论已经获得坚实的支持，或许获得大多数杰出的理论物理学家的承认。《物理学纪事》越来越成为该理论的主要论坛，在其中，理论被检验、概念和技术多方考察，以及被应用到各种新领域。在德国之外，接受相对论是比较缓慢和较为迟疑的。但是，不论他们是否在物理意义上接受理论，到1910年许多物理学家已经使用着它的方程。当时，这理论很少被物理共同体之外的人们所知晓。花了一段时间才把相对论扩散到一般的物理学家，而进入物理学教材甚至花了更长的时间。索末菲尔的著名著作《原子构造与光谱线》说明了狭义相对论的大众化过程，这本书主要为大学生与非原子物理专家而写。在从1919年到1922年的前三版中，索末菲尔从论精细结构的章节开始，其中附有一个18页的相对论介绍；在1924年版本中，这个介绍被他的一个乐观的评说取代了，他说：相对论现在已经成了一切科学家的共同知识。

从狭义到广义相对论

我第一次萌生广义相对论的想法是两年后的 1907 年。那想法是突然而至的。……我逐渐意识到：所有自然定律，除了引力定律，都能够在狭义相对论的构架内加以讨论。我想找出其原由，但我不能容易地达到目的。……一天突破突然降临。我坐在伯尔尼专利局我的办公室的围椅上，突然一个想法袭击了我：如果一个人自由下坠，他就不会感觉到他的重量。我向后退一靠。这个简单的思想实验给我一个很深的印象。它引导我抵达引力理论。(Einstein 1982, 47)

这就是爱因斯坦在 1922 年一次讲话中，描述那道路是如何开始的。这条道路引导他抵达人类历史上最基本的理论之一。尽管戴维·希尔伯特、冈纳·诺德斯特罗姆和少数其他人作出了有趣的贡献，广义相对论主要是爱因斯坦的工作。按照等价性原理，没有力学实验可以把一个恒定（无加速度的）、均匀引力场同一个其中无引力的匀加速度参照系区别开来。1907 年爱因斯坦以一种普遍的方式表述这条原理，对一切实验都有效，不论是否是力学的。从这一观点，惯性与引力无本质区别。爱因斯坦并未立即跟随这一思想，而是于 1911 年发展一条新研究纲领的第一个版本，即寻找引力的一个新理论，它同时导致等价性原理和相对论的一个扩展理论。相对论的这次扩展产生两个令人瞩目的预言：第一，光的传播受到引力的影响；第二，如爱因斯坦 1907 年论文中已意识到的，钟的速率在大引力质量附近缓慢下来。至于第一个预言，爱因斯坦发现太阳的光线偏转角度略小于 1 弧



秒，为0.83”。第二个预言中的钟可以是一个由单色谱线测量的发光原子，这里爱因斯坦计算了接受到的波长是如何随引力场而增加的——变成红移的。其结果是等价性原理的一个直接推论： $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\Phi/c^2$ ，这里 $\Delta\Phi$ 是光的发射与接受两处引力势之差。

爱因斯坦意识到：他1911年的理论只是迈向他所追求理论的一步。在接下来的四年里，他完全沉浸于对于新的引力相对论的、更复杂的寻觅之中。关键的问题证明是在数学方面。“在我的一生中，没有经历如此艰辛的操劳，”1912年他给索末菲尔德的信写道：“我已经变得浸没在对数学的极大关切之中，我简单头脑的隐秘部分被视为一种纯奢侈品，直至如今。”（Pais 1982, 216）在他的朋友数学家马瑟尔·格罗斯曼的帮助下，他认识到理论的数学工具是绝对微分运算（或张量分析），它源于19世纪高斯和黎曼的工作。在与格罗斯曼的合作中，爱因斯坦发展了引力的张量理论，在其中，时空不再被视为物理事件的惯性背景，它本身就是被引力物体的存在所引起变化的主体。他现在决意放弃狭义相对论的时空线元，用一个更复杂的张量表达式取而代之，它一般由10个二次项组成： $ds^2 = \sum g_{mn} dx^m dx^n$ 。同样，他不再把他的理论放在洛伦兹变换上，他想用一个更一般的不变群取而代之。1913年，爱因斯坦讨论了广义协变性要求——即，场方程在每一个参照系中必须具有相同的形式。他考虑满足这些要求的物理定律是有偏爱的，因为这会使武断最小化和世界图像最简化。可是，在表述了广义协变性原理之后，他放弃了它，取而代之的是提出一组并不具有这一性质的场方程。爱因斯坦作如此退却的主要理由是：他的广义协变方程在弱静引力场情形中不能退化为牛顿极限。他发展了一个后来称为“空洞论据”的论据，这论据使他信服一个基于广义协变方程的理论不可能是正确的解答。爱因斯坦误认为，这理论会破坏决定论与因果性。他花了两年的艰辛思考才认识到：广义协变性确实是他一切问题的关键。

1915年夏与秋，广义协变原理趋于成熟，在1915年11月他向柏林科学院递交了其广义协变方程的最后文本。他致信索末菲尔德说：它是“我一生中做出的、最有价值的发现”。

爱因斯坦1915年11月18日的论文，不仅包含一组新的、广义协变的与局域可满足的场方程，他还利用其新理论得到结论：他早年关于光的引力偏转错了2的因子。按照改进的理论，在太阳旁掠过的光线应该偏转 $1.7''$ 的角度。除了理论诉求的逻辑结构外，真正使爱因斯坦觉得他的理论正确是另一个预言。这次是一个已知的、关于水星近日点反常进动的效应。从1859年起，人们就知道：水星不是准确按牛顿力学所要求的方式绕太阳运动的。它的近日点缓慢地绕太阳进动，如天文力学所说明的，但具有一个不同的旋转速度。反常性虽每百年只有 $43''$ （约为观察到的进动的8%），但对于牛顿力学却是个足够大的问题。爱因斯坦不是第一个寻求说明水星反常进动的人，但他是基于一个基本理论而非刻意地给出一个定量说明的第一人。他的计算值近乎理想地与观察值一致。爱因斯坦早就知道水星进动问题将是任何新的引力理论一个石蕊检验。早在1907年圣诞节，他致信给他朋友康拉德·哈比齐特：“我希望清除迄今未被说明的水星近日点长度的长期变化……〔但〕迄今似乎仍不见效。”

1916年初，当欧洲处于第一次世界大战的血浴之中时，爱因斯坦得到了他的广义相对论。由于它的复杂性和不为人熟悉的数学形式，几乎没有物理学家能够理解（或甚至接近）该理论。但理论产生了三个预言，它们可用来判断理论在物理上的正确性，帮助缺乏想象力的数学家对梦幻进行检验。水星近日点进动的预言是伟大的成功，但不足以使怀疑者信服爱因斯坦理论的真实性。毕竟，爱因斯坦一直知道这个奇异性，所以，或许他多少把这结果建构在他的理论之中。难道不靠可疑的相对论就不能得到正确的结果吗？这就是德国几个反相对论者所宣称的，他们举出



由保尔·格伯 1902 年发表的理论，他在其中得到了一个关于行星近日点进动的预言，如 1915 年爱因斯坦所得到的。德国反相对论的领头人埃伦斯特·格尔克于 1917 年重新发表了这篇论文，用它来反对相对论和爱因斯坦的优先权。结果引起一场小纠纷。这也只是极少物理学家的作为，许多人，甚至是反相对论的人，认为格伯的理论纯粹是错的，他关于近日点的正确表达式纯属巧合，以此来作为反相对论的证据未免太傻了。

1915 年引力红移预言跟 1911 年的是一样的，它的检验极其困难。主要原因是被测的谱线来自被太阳灼热的大气。那里的红移不易跟诸如多普勒效应等其他效应区别开来。在 1915 ~ 1919 年间，几位研究者试图检验这个“爱因斯坦效应”。但在所有情形中，他们都找不到大小如爱因斯坦所预言的那种效应。不令人吃惊地，爱因斯坦迅速认可巴彻和格瑞伯的结果。虽然两位德国人的宣称受到其他实验家的批评，而且，直到很久之后整个问题才明朗化。约在 1920 年许多物理学家才逐渐相信爱因斯坦的预言跟观察合理地一致，或者，没有明显的不一致。例如，从 1917 ~ 1922 年威尔逊山太阳观察站的美国天文学家查尔斯·E·圣约翰相信他的仔细观察跟爱因斯坦的理论有差异；但在 1923 年他“转回”到相对论，并确认他已经证实了爱因斯坦的预言。有许多理由认为圣约翰态度的转变，跟许多其他物理学家一样，在很大程度上是第三个检验的影响，即 1919 年日蚀的测量。那次测量十分惊人地证实了光线弯曲的预言。

在爱因斯坦 1911 年第一次（不正确的）预言之后不久，少数天文学家寻求利用日蚀期间位于太阳边缘处附近恒星的位置来检验该预言。1912 年巴西日蚀远征队和 1914 年南俄罗斯日蚀远征队都未获结果。第一次是因为连续雨天，第二次则因为战争爆发。1918 年美国洛克观察站的天文学家成功地拍摄了日蚀掠过美国时的照片。报道没有发表，它包含了跟 1915 年预言相冲突的

资料。取而代之的是以弗朗克·戴逊和阿瑟·爱丁顿为首的、1917年计划的英国远征队，是他们产生了证实的结果。1919年日全蚀在两地被研究：一地是西非海岸外的主岛（被戴逊研究）；一地是巴西的索布拉尔（被爱丁顿研究）。照片为两个远征队所拍摄。当他们进行分析时，他们显示出光线的偏转跟爱因斯坦理论绝妙地（但不是理想地）吻合。戴逊在皇家学会与皇家天文学会的联席会上报告结果时说：“已经获得一个非常确定的结果，即光线是按照爱因斯坦的引力定律偏转的。”（Earman and Glymour 1980a, 77）其实，这是一个过于乐观的、只能从对于运算中可行性资料的处理中获得的结论，这处理包含摒弃那些跟爱因斯坦理论不一致的资料。爱丁顿是英国的相对论权威与先知。他完全相信广义相对论的真实性，他的先入之见给结果增添了光彩。不论怎样，预言被大多数物理学家和天文学家接受了，当然不是全部。当格尔克求助于格伯的旧理论借以取代爱因斯坦的水星近日点计算时，像维彻特和拉摩一样保守的人在20年代也这样做了。他们提议对光的弯曲作电磁学精细解释。但是，跟大量对爱因斯坦理论感兴趣相比，这一些以及其他非相对论的尝试不太引人关注。从社会学观点甚于科学观点来看，1919年日蚀远征队成为了相对论历史上一个转折点。

爱尔瑟·罗森撒尔-施内迪是1919年柏林大学一名哲学与物理学专业的学生。根据她的回忆，当爱因斯坦接到爱丁顿确认的消息时，他“十分平静”，他对她说：“我知道理论是正确的，你怀疑过它吗？”罗森撒尔-施内迪问他如果观察与理论不一致，他会怎样？爱因斯坦回答说：“我不得不可怜我亲爱的上帝。理论反正是正确的。”（Rösenthal-Schneider 1980, 74）

爱因斯坦作为一位万事通且有点自大、不在意实验的理性主义者的形象，无疑是广为流传的，而且，这也是他的神秘之处。但是，这看法基本上是错的，至少就较年轻时的爱因斯坦而言。



相反，爱因斯坦对于其理论的实验检验是深感兴趣的，而且常常安排这样的实验。例如，当1911年爱因斯坦预言光线会在引力场中弯曲时，是他试图使天文学家对检验预言感兴趣。爱因斯坦强调：他的广义相对论的封闭而逻辑的结构，对他来说，不仅意味着它必定因此而正确，而且不可能为了容纳某些实验而修改。在1919年致爱丁顿的信中，他写道：“我深信谱线红移是相对论的一个不可避免的结论。如果这效应在自然中不存在整个理论就不得被摒弃。”（Hentschel 1992, 600）关于光线偏转的预言，他也表白了同样的心态。当他听到结果时，远远不是“平静”，而是欢喜若狂。罗森撒尔-施内迪的故事是不可信的。爱因斯坦后来对于实验与理论之间的关系，渐渐采取一种柏拉图式的理性主义态度，是另一码事。

接受

爱因斯坦的相对论、达尔文的生物进化论、伦琴的不可见光和弗洛伊德的心理分析为知识界共享这样的事实，即它在科学共同体内外均受到极大的关注。它成为两次世界大战期间现代主义的标志之一，其重要性远远超出了物理学。爱因斯坦理论被贴上“革命的”标签，这一词汇通常是跟从牛顿物理学到爱因斯坦物理学的过渡联系在一起的。相对论的确是一场概念革命，而且，在20年代早期，动辄跟政治革命相联系，成为爱因斯坦理论的一种标志。可那不是爱因斯坦想要认可的一个标志。爱因斯坦并不把他本人视为一个革命者；在论文和讲演中，他重复地强调科学发展的演化本性。他常说，相对论是由牛顿与麦克斯韦奠定的物理基础的自然成果。例如，在1921年一篇论文中，爱因斯坦注意到，“以尽可能简单的形式呈现一系列观念的演化，这中间确有某些诱惑人的东西；然而，一种完全性充分到足以贯穿于这

发展的连续性之中。我们将为相对论奋力做到这一点，以表明，整个提升是由思想的许多小的、自显的步骤组织起来的。”（Hentschel 1990，107）

一般公众——包括许多科学家和大多数哲学家——只是在第一次世界大战末，特别是当广为宣传的日蚀远征队宣布证实了爱因斯坦理论时，才知晓相对论的。20年代大部分关于相对论的文献都是由非科学家所写，他们常常不仅完全误解相对论，并且，在它不能合理应用的领域内讨论它的蕴涵。有时作者把相对论“应用”于艺术理论，有的应用于心理学理论，甚至有人从爱因斯坦理论中抽象出广义的哲学和伦理学理论。伦理学宣称来自相对论，那么，它对理论的某些方面作摒弃处理，也就不奇怪了。爱因斯坦不是主张一切事物都是相对的，没有什么观点优于任何其他观点吗？

杰出的西班牙哲学家约瑟·Y·嘎瑟特是那些误用爱因斯坦理论来力挺他自己的宠物哲学的人之一，他称这哲学为“透视主义”。观赏一段妙文：“爱因斯坦理论是一切可能观点的和谐多样性的惊奇证明。如果这观念扩展到伦理学与美学，我们就会以新的方式面对经验的历史……我们现在不把非欧文化视为野蛮文化，而是代之以尊重它们，视它们为一些面对宇宙的、跟我们的文化等价的方法。存在一种中国式透视，它完全跟西方的一样正当。”（Williams 1968，152）顺便说，嘎瑟特的透视主义后来被许多西方人当作政治上正确而加以接受，并用来批评科学世界观。不论透视主义有什么优点，这些观念跟相对论风马牛不相及。

图 7.1 示出 1908 ~ 1944 年间德国论相对论的著作的分布曲线。锐峰出现在 1921 年，当时辩论达到顶峰。这图表既包括物理学教程，也包括大众的、哲学的、反相对论的书籍和小册子。第二类书的 3/4 书目被汇编成册在 1920 ~ 1922 年的高潮期出版。当然，物理学家在 1921 年前许多年就“发现了”狭义相对论形



式的相对论。虽然如前提到的，直到 1913 年，物理学家还不清楚爱因斯坦的相对论与电子理论方程之间的区别。图 7.2 为各大国早期相对论出版物的情况，人们对相对论的好奇始于 1900 年，而直到约 1912 年，德国在相对论理论上的主宰地位以及法国在相对论领域的空白，均十分引人注目。在 1910 ~ 1915 年间相对论出版物总数的下降（见图 7.1）为该时期著作分布的第二个特点。这第二个特点或许反映了到 1911 年狭义相对论已被物理学家广泛接受，不再被视为物理学的边缘了。只是到了 1915 年出现扩展理论之后，才又获得了上升的动力。

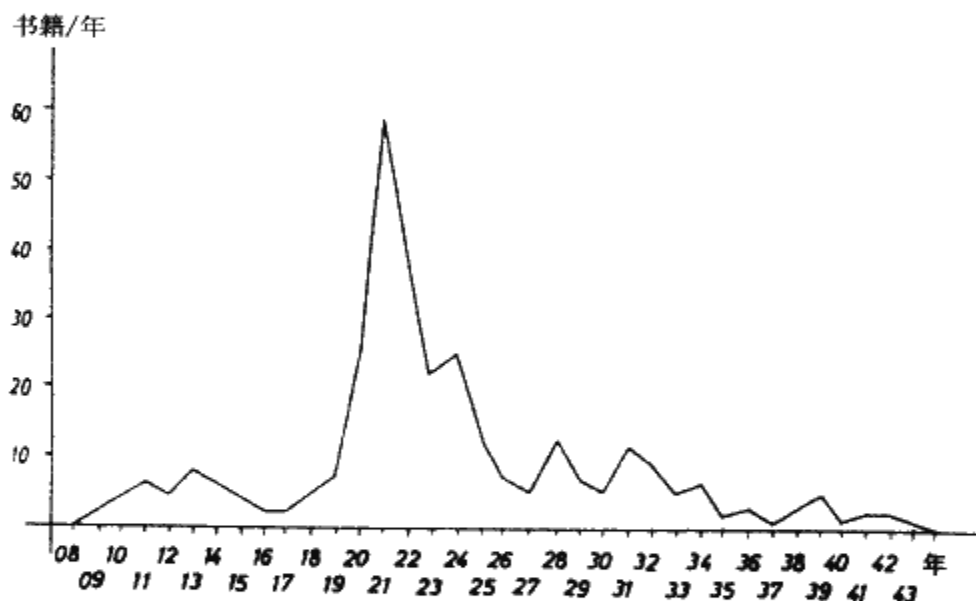


图 7.1 1908 ~ 1944 年间德国关于相对论的书籍。来源：Goenner 1992

相对论的接受依赖于具体的国家和文化环境（见表 7.1）。在法国，爱因斯坦的相对论原先受到冷遇。这情况无疑与法国的教育和研究的死板核心体系相关。除了朗之万以及很少的学生外，法国物理学家只是在 1919 年远征队成功观察日蚀预言成为国际头条新闻之后才广泛地关注相对论，而且，人们是以某种怀疑的眼光来接受相对论的——大战之后，感受到相对论是德国人

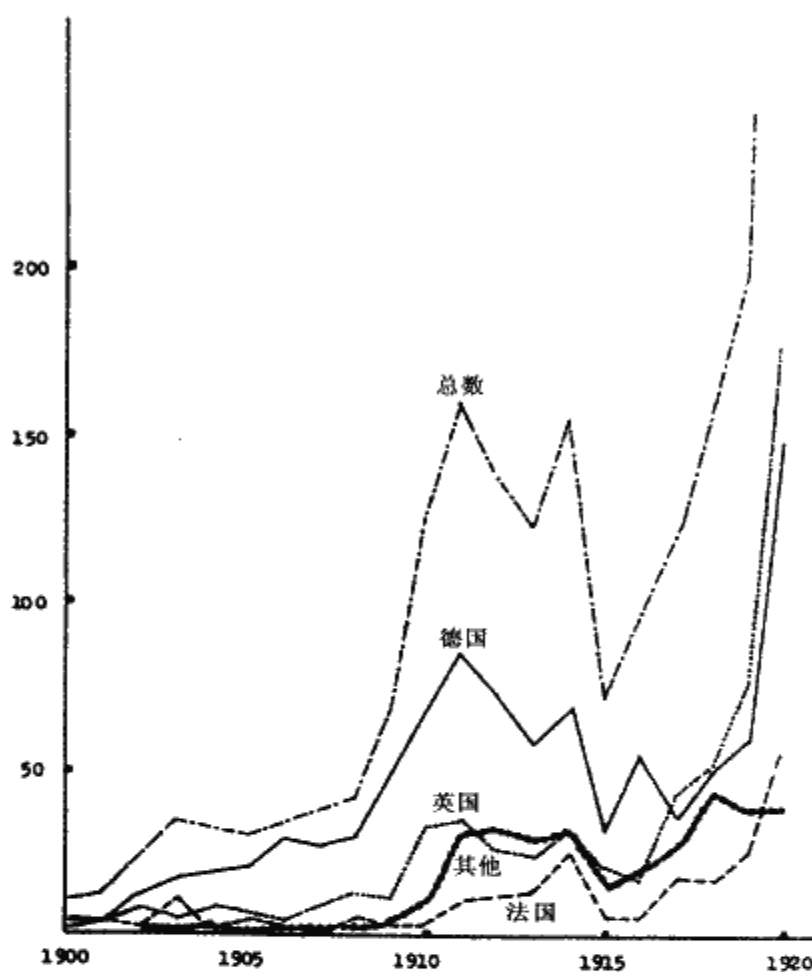


图 7.2 1900 ~ 1920 年间相对论出版物的分布

来源: *Studies in the History and Philosophy of Science* 12, 1981, 173 - 210

的理论，心里很不好受。

在美国情况是很不一样的，有许多不同的理由。有实质意义的是，能认真地研究它的两位物理化学家吉尔贝特·列维和理查德·托尔曼 1909 年写的一篇论文。他们以及几乎所有其他科学家都意识到相对论，倾向于按照实证模式呈现相对论。对于他们，相对论是从实验事实的一种归纳推广。这种观点跟爱因斯坦和他的德国同事们所持有的极不一样。密立根认为，“狭义相对论可以认为是从迈克耳孙实验的一种推广出发



表 7.1 1924 年以前关于相对论的科学出版物的国家分布

国 家	作者数	出版物数
德国	350	1435
英国	185	1150
法国	150	690
美国	128	—
意大利	65	215
荷兰	50	126
奥地利 (- 匈牙利)	49	—
瑞士	37	—
俄罗斯 (USSR)	29	38

注：资料取自 Hentschel 1990, p. 67

的”，这一观点几乎是所有美国物理学家所共同持有的。(Holton 1988, 220) 特别值得一提的是，在美国，对爱因斯坦理论“不民主”与反公共意识的批评相当普遍。普林斯顿大学物理学教授威廉·马吉是这种准政治反对派的代言人。在 1912 年的一次讲演中，他主张基本的物理理论“必须是对每一个人、对普通的人，跟对训练有素的学者一样可理解的”，多少不现实地坚持“所有原先的物理理论一直是如此可理解的”，马吉提出：科学的民主基础在于“力、空间和时间的原始概念，如它们被全人类所理解的”。但是，爱因斯坦并不以这样的概念为基础，这引导马吉华丽地质问：“难道我们没有权利要求那些为我们发展了相对论的思想领导人……去追索其光辉历程直到成功地用它归结于一种用物理的原始概念表达的作用模式的方式来说明相对论原理吗？”(Hentschel 1990, 75)

相对论降临俄罗斯稍稍早于美国。约从 1907 年起，在圣彼

得堡的保尔·埃伦费斯特理论物理研讨班上就讨论了这个主题。内战以后不久，俄罗斯变成了苏联，圣彼得堡还开出了关于相对论的扩展的课程，亚历山大·弗里德曼在那里建立了一个重要的理论物理学院，对相对论宇宙学做出了重要的贡献。但是，跟30年代和40年代的情况相反，相对论不被视为一种有意识形态争议的理论；虽然，有些真正有马克思信仰的捍卫者在辩证唯物主义的名义下反对相对论，但是，哲学与政治的反对并没有干预圣彼得堡（1924年改称为列宁格勒）以及其他地方所发生的、科学的相对论研究（可参阅第十六章）。

相对论大部分是德国人的理论，或者，有人认为是德国-犹太人的理论。跟在德国的活跃讨论以及那个国家的重大贡献相比较，英国物理学家对于新理论的建设性响应是缓慢的。部分原因是爱因斯坦摒弃了以太，这个概念是大多数英国物理学家所执着和不甘愿放弃的。1914年出版的埃本尼泽·坎宁哈姆的《相对论原理》是英国人写的第一本相对论的教程。早年的狄拉克就是从这本书中学习相对论的，这书仍然包含了以太世界观的痕迹。例如，相对论原理是这样表述的：“由经验提示的一般假设：不论美学的媒体的本质如何，我们都不可能用任何可设想的实验获得物体相对于它的速度估值。”（Sánchez-Ron 1987, 52）跟别处一样，到1919年相对论在英国才有突破，当时，爱丁顿是相对论的源头。在1920~1923年间，出现了几本论相对论的单行本，其中，爱丁顿的《空间、时间与引力》（1920年）和《相对论的数学理论》（1923年）成了国际畅销书。在某些方面，对相对论兴趣的突然崛起反映了大战之后的一般文化状况。狄拉克有这样的回忆：

不难看到这种巨大影响的理由。我们一直生活在恐怖而极严峻的战争之中……每个人都想忘却它。于是，



作为引向一个新的思想领域的绝妙观念的相对论，来得正当其时。它从战争中逃逸而出……相对论是每个人都感到自己以一般哲学方式竞相写下的主题。哲学家只是推动这样的观点：每一事物都必须视为相对于别的事物的，而且，它们并不要求已经知道一切相关的相对性。

狄拉克 1977 年的回忆有许多原始文献的支持。例如，1922 年 8 月，英国《晨间邮报》的一位编辑，笔下提供了另一种说明：“战争的一个结果是这个国家的科学意识被激活了，公众对科学成就（不论是理论的、还是实践的）兴趣明显增加。战前，街上行人或酒吧窗前的人，都不可能规劝去阅读有关爱因斯坦与牛顿之争的文章。”（Sánchez-Ron 1992, 58）

但是，事情真正发生的地方是在说德语的欧洲。不仅这是爱因斯坦的世界，它也是普朗克、劳厄、外尔、希尔伯特、闵可夫斯基、玻恩、洛伦兹和泡利的世界。一个数学上建设性的、概念上沟通的辩论发生之地只能在德国，而且，也是在这里破坏性的反相对论者的讨论兴起最早、持续最长。相对论受到一群松散的德国右翼物理学家的攻击，他们不仅政治上极右，而且被认可具有保守的科学美德，诸如经典机械论、因果性、可视性以及基于实验而非理论的物理洞识等。反相对论以及有时也反量子的、尖刻而中坚的分子是菲力普·勒纳德、约翰尼斯·斯塔克和埃伦斯特·格尔克，所有这些人都是有名的物理学家。勒纳德和斯塔克是诺贝尔奖获得者，而格尔克 1921 年任帝国物理技术所的一般教授，是实验光学的公认专家。反相对论的物理学家拒斥爱因斯坦理论，认为它是荒谬的、思想危险的，而且缺乏实验证实。如果有某个相对论方程被证实了，他们则坚持基于经典基础也可导出那些方程。四维时空、弯曲空间和孪生悖论，统统被斥之为是一些没有物理意义的数学抽象概念。从 1920 年起，德国反相对

论的十字军利用一个反爱因斯坦的集会凸现了他们的意向，这集会在柏林举行，由政治活动家保尔·卫兰德组织、由吉尔克主持。爱因斯坦尖锐而公开地回敬了这个集会，指出反亲犹太主义是反相对论运动议事日程的一部分。在接下来的几年里，勒纳德、斯塔克、吉尔克和他们的同盟者发行大量的文章、小册子和书籍继续攻击爱因斯坦和相对论。按照他们的说法，相对论根本不是科学，而是一种观念形态，一场由爱因斯坦及其在德国物理学中的权贵朋友们巧妙炮制的幻觉。格尔克的一本反相对论的书，就用了这样特征性的书名《相对论：一个科学的乌合提议》（1920年）。尽管过分渲染、能量不小，反相对论者未能遏止德国理论物理在20年代的前进；相反，他们自己却被边缘化了。只是在1933年以后，一个新的政治体系篡夺了政权，反相对论主义在德国才占据了有点重要但仍然有限的地位。

第八章 | 一场失败的革命

在前几章中，我们常常提到电磁学世界观是物理学的机械世界观的主要对立理论。似乎很奇怪，在真正的相对论问世之后，这个不正确的世界观仍然占有重要地位，因为 1905 年之后，物理科学家必定已经承认电子论（在其广泛意义中）劣于相对论。或许，他们应该是这样认为的，但是，事实是，他们没有这样，电磁学世界观反而是在 1905 年之后经历着它的顶峰，并且，至少花了 5 年多的时光，人们才承认这种对于物理学的新基础进行表述的宏大企图可能是站不住脚的。

电磁质量的概念

如第一章中所提到的，在世纪之交，机械世界观遭到攻击，正处于被一个基于电磁场的观点所取代的过程中。新观点较根本而精细的版本，称为电磁学世界观，约形成于 1900 年，大约繁荣了十来年。它的核心纲领是把力学充分地还原为电磁学。在这新的物理学中，物质消失为非物质，被电磁场的种种效应——电子所取代。这个纲领是以 19 世纪 80 年代和 90 年代电动力学的发展为基础的，在这期间，一个关于自然的不太完全的电磁观出现了，并导致拉摩、洛伦兹和维彻特等人的电子论。在这过程中，

两个传统起作用：一个是韦伯及其追随者微粒电动力学传统，它运作处于即时相互作用的荷电粒子，但没有场的概念，这传统仅对洛伦兹和维彻特才有重要性；与之相反，另一传统坚实地以麦克斯韦方程为基础。1894年维彻特就已经清楚地持这样的信念，即质点可能是一个副现象，而且，唯有真正的质量才具有电磁本原，它由他描绘为以太的激发的、假设的荷电粒子组成。维彻特的见解预期着电磁学世界观发展，但他在这领域的工作多少被洛伦兹和像马克思·阿布拉汉姆及阿多尔夫·布彻勒的工作所遮掩。

1881年，年轻的J·J·汤姆孙证明：当一个球在以太中运动时，它将获得一种显质量，类似于一个球在不可压缩流体中运动的情况。对于一个带电荷 e 、半径为 R 的球，他发现电磁诱生质量为 $m' = 4/15 e^2 / R^2 c$ 。这个第一次引入的电磁质量后来被行为怪癖的英国工程物理学家奥利弗·海维赛德所改进，他于1889年导出公式 $m' = 2/3 e^2 / R^2 c$ 。汤姆孙认为“显质量”不是实在的；与之相反，海维赛德将其视为真实的物质之量，它是球的可测的或“有效”质量的一部分。进一步的改进由威廉·维恩于1900年获得，发表在一篇题为《论力学的一种可能的电磁学基础》的论文中。维恩在低速极限中证实了海维赛德公式，却补充了一个重要的结果，即电磁质量依赖于速度，如果速度接近光速，那么它就跟海维赛德的不一样了。电子或带电体的质量如何准确地依赖于速度，很快变成了新电子物理学中的一个关键性问题。维恩1900年的论文一直被认为是电磁学世界观的第一个清晰的声明。在维恩假设一切质量都具有电磁本原的范围内，这声明证明是正当的（尽管有维彻特的早期表述）。维恩主张：物质是由电子组成；而电子则是具有电荷的粒子，是电荷置于其上的小球。其次，他主张：牛顿的力学定律必须作电磁学理解；如果不能到达完全的对应性，那么，电子论就是这两者的更深厚与更基本的



理论。

第一个详细的电子模型是由马克思·阿布拉汉姆构造的，这个哥廷根物理学家 1897 年在普朗克指导下毕业。按照阿布拉汉姆 1902 年写的论文，物理学中最重要的问题是：“电子的惯性能够完全被它的场的动力学作用加以说明，而不借助于独立于电荷的质量吗？”（Goldberg 1970, 12）这部分是个修辞学的问题。阿布拉汉姆深信这个问题必定能被肯定地回答。他在 1903 年一篇论文中对电子动力学作了详尽的研究。他在以上两个方面跟两年后的爱因斯坦相对论形成鲜明的对照。爱因斯坦的论文数学简单，而阿布拉汉姆的则是一门数学绝技；爱因斯坦写满了 31 页，而阿布拉汉姆的则不少于 75 页。两篇论文都发表在《物理学纪事》上。这杂志常常发表现代物理期刊闻所未闻的长论文。在其 1902 ~ 1903 年的著作中，阿布拉汉姆认为：能充分用电磁学理解的电子只有一种，那就是，具有均匀面电荷分布或均匀体电荷分布的刚体。对于这样的电子，他计算了它的质量——纯由电子的自场引起——并发现一个速度变化关系，至 $\beta^2 = (v/c)^2$ 的第一级，可写为 $m = m_0 (1 + 2/5\beta^2)$ ，这里， m_0 表示电磁静质量 $2/3e^2/R^2c$ 。

质量随速度而变的观念是洛伦兹自 1899 年发展的研究纲领的一部分。洛伦兹的进路跟维恩和阿布拉汉姆的不同，他不甘愿追随他们关于一切质量都具有电磁本源的信念。可是，1904 年他克服了他的谨慎风格，并从那年开始，在他的电子论中他就支持电磁学世界观了。不仅他的电子质量具有电磁本源，而且他主张一切运动的物质（不论是否由电子组成）必须遵从电子的质量-速度变化特征。1906 年在一次为哥伦比亚大学的讲座中，他一开始就说，“我本人是乐于采纳关于物质和质点之间的力的电磁学理论的。”他接着说，“至于物质，许多论据均表明：其极终粒子总要携带电荷，而且，这些电荷不只是附属的，而且是实质的。

我们应该引入在我看来是一种不必要的、二元论的东西，如果我们考虑这些电荷，以及别的可能存在于粒子之中却彼此全然不同的东西。”（Lorentz 1952, 45）可是，洛伦兹的电子是跟阿布拉汉姆的刚性粒子不一样的。它是一种可变形的电子，即沿其运动方向会收缩，从而获得一个椭圆形状而不是原来静止时的球形。阿布拉汉姆反对洛伦兹理论的这一特征，因为电子的稳定性会要求某种非电磁力；阿布拉汉姆认为发展背离电磁学世界观的精神。但电磁学世界观的精神的准确含义是什么，似乎还有待付诸辩论厘清；并非所有物理学家都从阿布拉汉姆的理论中看到电磁学世界观的实质。例如，1908年，闵可夫斯基就认为刚性电子似乎是“一个跟麦克斯韦方程不适应的怪物”，并且，机智地说，“带着刚性电子走近麦克斯韦方程，在我看来，好像是耳朵塞着棉花球去听音乐会。”（Miller 1981, 350）

对于质量的变化，洛伦兹推导了著名的、今天只跟爱因斯坦的相对论相联系的平方根反比公式： $m = m_0(1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ ，或者，近似地 $m = m_0(1 + 1/2\beta^2)$ 。容易看出：洛伦兹公式跟阿布拉汉姆公式之间的实际差别是很小的；实验中要区别它们，则要借助高速的电子。

阿布拉汉姆的刚性电子和洛伦兹的形变电子是最重要的电子模型，但不是仅有的模型。1904年，德国物理学家阿多尔夫·布彻勒，以及巴黎的保尔·朗之万独立地提出了又一个模型，其特征是电子在运动中体积不变，所以，它在一个维度上收缩，便在其他维度上膨胀。布彻勒-朗之万的理论导致一个跟阿布拉汉姆和洛伦兹的都不相同的质量速度关系。为了在不同理论——包括爱因斯坦的，它通常被视为洛伦兹理论的变种——中作出抉择，必须诉求于精确的实验。在我们转向实验-理论关系问题之前，我们将考虑电磁学世界图像的其他更广方面。



作为一种世界观的电子理论

到1904年，关于世界的电磁观已经腾飞，它在取代已被广泛视为过时的、物质的和原始的机械观的过程中显露出一种极具诱惑力的姿态。作为新理论强度的标志，它不仅在专业期刊中被讨论，而且，开始出现在教科书当中。例如，布彻勒在一本1904年的教程中介绍了他的电子论。更重要的是，同年阿布拉汉姆出版的电动力学教程多次再版，在德国和国外广泛使用二十多年。教程是1899年奥格斯特·弗普尔写的关于麦克斯韦理论的教程的修正本。但是，不顾弗普尔曾给出麦克斯韦方程的力学推导，阿布拉汉姆利用自己的修正版，把弗普尔关于力学和电磁学的优先权倒转过来，在1905年的成套教程中，阿布拉汉姆未多加犹豫便以电磁学世界观的传教士身份出现了。

为纪念美国路易斯安那州成立一百周年，1904年8月在圣路易召开了一次艺术与科学大会。在物理学代表中有许多国际物理学的领导人，包括卢瑟福、庞加莱和玻尔兹曼。许多演讲的一般信息是：物理学正处于转折点；电子学正走在其建立物理学新范式的路途中。在其对数学物理中诸问题的俯瞰中，庞加莱说到表征这一时期特点的“原理的一般沉沦”。庞加莱本人对电子论作过重要贡献，他现在情愿做出这样的结论：“电子的质量，或至少说负电子的质量，排它地具有电-动的本源……除了电-动惯性，不存在质量。”（Sopka and Morser 1986, 292）另一位法国物理学家，32岁的保尔·朗之万，其演讲是更为详细的，但不乏傲慢、不乏辩才、不乏对电磁世界图像的偏爱。朗之万主张他自己（和布彻勒）的电子模型，但他真正关切的不是电子的详细结构，更重要的是物理学新纪元的来临，正如朗之万在其结束语中所陈述的：

我刚才扼要而快速地透视是充满乐观的，而且，我相信：在物理学史上很少有机会既如此地看到过去，又如此地看到未来。这种广泛而稀罕地考察领域之各部分的相对重要性，今天做的显得跟一百年前做的不一样的：从新的观点看来，不同的方案以新的方式安排自身。最后发现的电子观念，今天似乎主宰着整体。俨如一块选择之地，在那里，探险家在进入一个新国土之前，觉得他发现了一座城市。……实际的趋势，使电磁学观念占据优势地位，是正当的；因为，我已经利用双重根基的坚固性对此寻求了说明，电子观念〔麦克斯韦方程和经验的电子〕就安放在这根基上。……虽然最近我寻求从中给出一个集合想法的概念，差不多深入到整个物理学的核心了，而且，它差不多起着沃化种子的作用，以新的秩序将其周围结晶化，诸多事实是彼此远离的。……在过去几年里，这想法有了巨大的发展，使它粉碎了旧物理学的构架，推翻了旧的观念和定律的秩序，以及在一个组织中又长出枝芽来，人们预期它们是简单、和谐和富有成果的。

在1905年左右的文献中可以发现大量的跟朗之万相类似的评价和相同代语和比喻，其中很少提及量子理论或新的相对论。

电磁学研究纲领背后的方法论明显地是还原论。其目的是建立一个关于世界中存在的一切物质与力的统一理论。这理论的基础是麦克斯韦的电动力学，可能是其某种修正的或扩展的版本。它是一个极其宏伟的纲领。它一旦完成了，则没有未加说明的遗留事物——至少原则上。就这意义而言，它显然是“每一事物的理论”的一例。基本粒子、原子和量子现象，以及甚至引力都被



视为世界的基本基础（电磁场）的种种显示。试图用电磁相互作用来说明引力的努力，要追溯到 19 世纪 80 年代，意大利物理学家奥塔维阿诺·莫苏第当时提出这样一个理论。后来在该世纪，德国人威廉·韦伯和卡尔·弗里德利希·泽尔纳基于他们关于即时相互作用的荷电粒子观念的理论在数学上详细地发展了这一思想。在场的电动力学成为电学与磁学的主宰构架之后，电引力理论继续被讨论。例如，1900 年洛伦兹基于他的电子论，推导了一个引力定律，他认为那是牛顿定律的一个可能推广。力图统一宇宙这两种力，通常把引力还原为电磁学，是电磁学纲领的一部分，但是，尽管做了大量的工作，仍没有找到满意的答案。

电磁学世界观也是物理学之外的人们关注的事，偶然它被哲学家所讨论。它甚至进入政治学，如列宁在《唯物主义与经验批判主义》所说明的。这是一部政治哲学著作，由列宁 1908 年逃亡日内瓦与英国时所著。在他努力陈述自然的辩证唯物主义概念中，列宁引录了庞加莱、瑞吉、劳德吉和其他物理学家的著作，说明物理学处于危机状态。“电子，”这位未来苏联的领导人写道，“跟原子一样是不可穷尽的；自然是无限的，可它是无限地存在着。”列宁的意思不甚清楚。在当时，弄不清楚或许是意想中的事。

从德国科学家与物理学家协会的一次聚会可进一步说明理论物理学的革命氛围。这次聚会于 1906 年，就在爱因斯坦引入相对论之后，在斯图加特举行。大多数电子论的领导人参加了，一般的意见是赞成以纯形式表述的电磁学世界观，例如由阿布拉汉姆发展的那种。洛伦兹理论受到批评，因为它依赖于非电磁的稳定力；只有普朗克反对这种理论非议，捍卫洛伦兹（与爱因斯坦）的理论。普朗克认为刚性电子是跟相对论假设不相容的。这种说法偏颇于洛伦兹理论。而从阿布拉汉姆及其同盟者立场看，洛伦兹是自相矛盾的。在其同盟者中有 37 岁的阿诺尔德·索末

菲尔德，他后来成为量子与原子物理学的一名领导人。索末菲尔德清楚地说明：洛伦兹-爱因斯坦理论事物是无望的保守的；它是试图拯救一个难于救活的、行将就木的机械世界观。虽然，普朗克承认电磁学纲领是“很美的”；他只把它当作一个纲领而已，而且，它几乎不能满意地运作起来。对于索末菲尔德来说，这样的态度是不可取的“悲观主义”。

世代的叛逆是革命的一部分，并且，索末菲尔德物理学中的新范式特别诉求于较年轻的一代：“在普朗克表述的原则问题上，”索末菲尔德说，“我怀疑40岁以下的绅士们喜爱电动力学假设，那些40岁以上的人喜爱力学-相对论假设。”（Jungnickel and McCormmach 1986, 250）时代化或许是足够公平的，虽有个别例外。例外中的一人是爱因斯坦，索末菲尔德年长他十岁；例外中的另一人是洛伦兹，他超过年龄界限很多。在斯图加特大会之后不到10年的时间内，革命者与保守者之间的地位翻了个边。现在，1914年，阿布拉汉姆写道：“旧式物理学家在这场关于质量概念的革命中必定怀疑地摇摇头。……塞满新世纪报告厅的年轻数学物理学家们热情地欢迎相对论。老一代物理学家……主要以怀疑眼光看待勇敢的青年人，他们基于仍被专家讨论着的少数几个实验，就干起推翻一切物理测量的可信赖的基础的事业来。”（Goldberg 1970, 23）

在世界观讨论中一个重要的争论就是以太的地位问题。关于以太以及它与电子论的关系存在广泛而混乱的分歧，只有少数物理学家对以太论持否定态度。1905年大多数观点似乎是以以太作为新物理学的一个不可分割的部分贯穿始终的。例如，1905年洛伦兹在哥伦比亚大学的讲座中，说到以太是“电磁能量的储存所，以及作用于重量物质上许多或许全部力的运载工具……我们没有理由说及它的质量或作用其上的力。”（Lorentz 1952, 31）以太在“旧物理学”被攻击之后还幸存。于是，普朗克1909年写



道：“取代所谓的自由以太，存在绝对的真空……我把那种不将任何物理性质委归于绝对真空的观点视为唯一的始终不渝的观点。”（Vizgin 1994, 17）普朗克不是第一个用词汇“真空”同义于“以太”的人。从这一点出发，只要迈一小步就可宣布以太不存在了。这是德国物理学家埃米尔·科恩作的精确结论，他是一位电动力学专家，1900~1904年间，发展了自己的无以太的电子论版本。世事纷呈，一个人可以始终不渝地否认相对性原理和以太；或者，否认相对性原理而接受以太，如阿布拉汉姆所为；或者，接受相对性原理和以太，如洛伦兹所为；或者，接受相对性原理而否认以太，如爱因斯坦所为。怪不得，诸多物理学家被弄糊涂了。

质量变化实验

显然，对于纷争的回答要靠实验。检验各个理论的预言，并据此决定谁最靠近真理，至少原则上是可能的。事实上，在阿布拉汉姆提出他的电子模型时，就首先进行了实验，用来确定力学质量与电磁学质量的分布。沃尔特·考夫曼，哥廷根物理学家，他于1897年与汤姆孙同时地测量了阴极射线的荷-质比；1900年开始了一系列实验，其中，他采用了电场和磁场偏转电子束。为了找到电子质量的速度相关部分（即电磁质量），具有极大速度的电子是必需的；为此，考夫曼使用了 β 射线，其电子速度新近被测为高达光速的90%以上。

考夫曼不仅是一位优秀的实验家，也是一位有才干的理论家。他是电子论和电磁学世界观的早期倡议者。人们有点怀疑他对新物理学的热情是否影响了他对其实验资料的解释。1901年他得出结论：约 $1/3$ 的电子质量具有电磁本源。当他知道阿布拉汉姆的新理论时，他很快重新解释他的实验，力图到达一个不同的

结论，即电子的全部质量都具有电磁本源，以便跟阿布拉汉姆的观点一致。考夫曼与阿布拉汉姆是哥廷根大学的同事，这种个人关系以及考夫曼倾情电磁学世界观致使他宣称：它的正当性已为他的实验所证明。1903年他得出结论：不仅 β 射线电子，而且，阴极射线电子的运动都与阿布拉汉姆的理论吻合。

1905年以后，当洛伦兹理论（或洛伦兹-爱因斯坦理论）成为阿布拉汉姆的一个竞争者时，考夫曼进行新的实验，以便解决质量随速度变化的问题。各种复杂的实验导致这样的结果：它们明显拒斥洛伦兹的理论，却跟阿布拉汉姆的理论以及也跟布彻勒-朗之万的预言合理地一致。考夫曼得出结论：把物理学置于相对性原理假设基础上的企图“将被视为一种失败”。在1906年的斯图加特大会上他的实验被热切地讨论，大多数与会者站在考夫曼一边，支持刚性电子假设，反对形变电子假设与相对性原理。可是，人们意识到：实验的正确解释并不是直接的。而且，普朗克警告：在考夫曼的分析中，存在许多不确定性和疑点。因此，他提出：在阿布拉汉姆与洛伦兹的两个理论之间，实验家现在尚无能力作抉择；需要新的实验。

理论家的反应各色各样。阿布拉汉姆乐于接受考夫曼的结论；洛伦兹虽不太高兴，却也接受了。洛伦兹感觉到他的整个理论受到威胁——事实上，证明是错的。他致庞加莱的信写道：“不幸，我关于电子变瘪的假设跟阿布拉汉姆的新结果相矛盾，我必须放弃它。因此，我不知我该如何做。”（Miller 1981, 337）哲学上，洛伦兹的行为俨如卡尔·波普尔的科学哲学的“证伪者”。爱因斯坦就不是这样的，他的反应颇跟哲学家伊姆勒·拉卡托斯所举荐的一致。首先，爱因斯坦不理睬考夫曼宣称的拒斥，而是怀疑他对实验资料的归纳与解释有错。是的，实验跟相对论不符；但是，这并不意味着理论错了。这必定意味着实验是错的。“在我看来，”爱因斯坦1907年写道，“阿布拉汉姆与布彻



勒-朗之万的两种理论，成功的可能性都相当小，因为它们涉及运动电子质量的基本假设不可能用包容更复杂现象的理论体系来说明。”（Miller 1981，345）爱因斯坦的态度（以及普朗克同样）不是简单地因为它跟一个偏爱的理论不符就否认考夫曼实验的有效性。爱因斯坦与普朗克深入到实验的细节之中，仔细地分析了整个情况，然后才得出结论：有充分理由怀疑存在系统误差。

不论如何，爱因斯坦对他的理论的早期信心很快证明是有道理的。在1908年的实验中，布彻勒，这位考夫曼的理论与实验上的对手，以不同于考夫曼的方式测量了 β 射线的电偏转与磁偏转。他的不同实验结果导致了确认洛伦兹-爱因斯坦理论的结论。考虑到布彻勒本人曾提出过一个关于电子的叛逆理论，并曾获得考夫曼实验的支持，那么他现在的毫不犹豫地批评考夫曼实验，并根据他自己的实验得出的只有洛伦兹理论才是能独立生存的结论就非常引人注目了，当时，布彻勒对他自己的恒定体积电子论因跟色散现象矛盾而丧失了信心。因此，他把他的实验视为对于仅有的阿布拉汉姆和洛伦兹的理论的一种检验。布彻勒的实验远比考夫曼的透明，这种透明性增加了它的可信度，当然，它不是无可指责的，它并不构成支持洛伦兹-爱因斯坦理论的判决实验。在接下来的几年里，实验继续着，大多数在德国进行。过了一段时间之后，实验情况稳定下来，结局是：被实验证实的质量变化关系被广泛接受了。到1914年，这问题大体是尘埃落定了。尽管定论还不是完全稳定的：在爱因斯坦理论已被接受和关于自然的电磁观已经沉沦几年之后，讨论仍在继续着。

我们将不再把故事讲下去，要提及的是在1920年以后质量变化问题进入一种政治维度。那时，反相对论主义开始在德国文化生活中开始泛滥。许多保守的物理学家渴望爱因斯坦理论会被一个基于以太或电磁学概念的理论所取代。颇具讽刺意义的是，在这些保守的人当中竟包含电磁学世界观的原先倡议者，几年

前，他们自认为是勇敢的反旧式机械主义的先锋。阿布拉汉姆，曾是为首的革命派，现在是那些绝不接受相对论并反对摈弃以太的物理学的人之一。布彻勒，另一位电磁学革命家，对相对论做出过违心贡献的人，在 20 年代变成了德国物理学右翼的一个热情反相对论者。在这样的局面下，关于电子的质量变化进行新的实验，有时带有明显的拒斥相对论的意向。而且，事实上有些反相对论者说，他们的实验在拒斥爱因斯坦理论的同时证实了的阿布拉汉姆旧理论。另一些包括布彻勒在内的物理学家接受洛伦兹-爱因斯坦公式，但小心地把公式同爱因斯坦的理论区别开来。“今天，”布彻勒于 1926 年写道，“对于洛伦兹公式的确认，不再被引证用来证明爱因斯坦的相对论了。”（Kragh 1985, 99）

一个世界观的沉沦

电子实验是电磁世界观沉沦的一个因素，但它们只是许多因素当中的一个。虽然实验是从属于实验检验的，世界观则不是。事实上，一个包含物理一切实在方面的、充分电磁物理学的可能性的学说，绝不会被驳倒的。它只是渐渐丧失其早期诉求时的革命性了。一场革命难于维持一段较长时间，特别是在对于未来赋予很高期待，却未显示迹象将变为现实的情形中。至少到 1914 年，电磁学世界观已经丧失它的魔力，它的许多倡议者收缩为主流物理学边缘的一小群。在第一次世界大战爆发后不久，埃米尔·瓦伯格在《当代文化》丛书中编辑了一本书，包含物理学不同领域的总结性论文 36 篇。在这本半官方著作的作者中，有像维彻特、洛伦兹、鲁本斯、维恩、爱因斯坦、考夫曼、塞曼和普朗克一样的德国文化界的领头物理学家。从物理学在书中的份量可看出各学科当时发展状况：



力学	79 页
声学	22 页
热学	163 页
电学	249 页
光学	135 页
一般原理	85 页

热学各章不仅包含黑体辐射，而且，还有爱因斯坦论《理论原子学》的论文，即物质的动理学。在电学的 13 篇论文中，有 1 篇无线电报学，1 篇关于 X 射线和 3 篇涉及放射性。爱因斯坦写的论相对论的论文放在一般原理的名目之下。电磁学世界观几乎看不到了，只是间接地进入到洛伦兹论《麦克斯韦理论与电子论》的论文中。

为什么电磁学纲领出局了？它的沉沦过程是复杂的，既有科学的理由，也有涉及时代文化氛围变化的原因。如前文提及的像阿布拉汉姆理论所产生的那些实验预言并不跟实验结果一致。但是，这很难是沉沦的一个主要原因，因为刚性电子不是电磁学世界观的不可少的成分。更重要的原因是跟其他理论的竞争，它们或反对电磁学观点，或威胁要把它变为多余。虽然，相对论有时跟洛伦兹的电子论相混淆，或宣称跟电磁世界观相容。但是，约在 1912 年，爱因斯坦的理论是一类不同的理论，已经变得明显了。只需提到它根本没有说及电子的结构，而且，随着相对论观点越来越被承认，电子结构问题——几年前还是实质的——的地位大大地改变了。对许多物理学家来说，它变成了一个膺问题。相对论的崛起使电磁学的热心者难于存活了，量子力学的崛起也如此。1908 年左右，普朗克得出这样的结论：在量子理论与电子论之间存在冲突，而他是受到洛伦兹和其他专家谨慎地支持的。似乎从纯电磁学基础没有办法推导出黑体辐射谱来。当量子理论变得越来越重要时，电子论变得越来越不重要了。对于一场公开

的革命，最糟糕的事莫过于根本就不需要它。

一般而言，电子论必须跟物理学中不依赖于它的其他发展相竞争，而在 1910 年以后，物理学的新发展把人们的兴趣从电子论中引开了。所以，许多新的有趣的事发生了，所以何必要基于电磁场寻找一切物理学而陷入复杂而过分暧昧的努力当中自寻烦恼呢？卢瑟福的有核原子、同位素、玻尔的原子理论、X 射线被晶体散射、斯塔克发现谱线的电分裂、莫勒用 X 射线理解周期系、爱因斯坦把相对论扩展至引力以及其他革新，吸引着物理学家的智能，把电磁学世界观抛在了后面。它确实是一个美梦，但那是物理学吗？在物理学中发生了许多进展，而且，随着原子结构被更好地理解，电磁观就越来越难于被支撑了。当塞曼效应指示电子携带负电荷时，从 1896 年起，正电荷就一直是原子理论中的一个问题。一个跟电磁学世界观相和谐的关于物质的理论需要正电子，但没有发现正电子。1904 年一位物理学家哈罗尔德·A·威尔逊提出： α 粒子是正电子（“在特征上跟一个正常的负电子准确相似”），而且，它的质量具有纯电磁本性，就是说，它满足表达式 $2/3e^2/R^2c$ 。代价是 α 粒子要具有一个小于电子半径几千倍的半径。由于 α 粒子就是氦离子，所以代价又变得更大了。引入正电磁电子的其他建议未获更大成功。并且，由于卢瑟福发现真正的正粒子——质量为几千倍电子质量的原子核——正、负基本电荷诱人对称性便丧失了。

但是，原子物理学的进展可被而且事实上常被解释为在性质上是跟电磁观相一致的。卢瑟福本人就倾于这一观点，即一切物质本质上是电磁本源的。而且，他 1914 年认为：原子核的细小性恰好就是它的电磁本源所期待的东西。原子核物理学的其他早期研究者均追随他的观点，只是在 20 世纪 20 年代，电磁质量问题才在物理学的这一领域中销声匿迹。可是，这并不意味着，卢瑟福和他的同事们是欧洲大陆意义上的电磁学世界观或电子论的



支持者。大多数对电子论做出贡献的是德国人；如果有英国人，那也很少。这不是偶然的。英国人与德国人的态度存在一些微妙的差别。相信物质的电子论，如许多英国物理学家所为，是一回事；消除一切力学概念和定律，偏爱于阿布拉汉姆及其同盟者所追求的概念和定律，则是另一码事。在任何情况下，关于原子核电磁本源的假说是以信念为基础的，不是以实验论据为基础的。与电子不同，原子核或离子不可能被加速到可检验其质量的什么部分是电磁的，什么部分是力学的。

统一场论

到 1910 年，维恩、阿布拉汉姆及其同盟者的原始电磁纲领遇到许多严重麻烦，不只是因为它反对进步的相对论。在电磁观与狭义相对论之间并不存在任何必然的矛盾，尤其是在 20 世纪 20 年代少数物理学家把电磁观并入到爱因斯坦的相对论中复兴了电磁学纲领。对于这种统一的电磁理论，爱因斯坦本人有极大的兴趣。它也吸引了几个其他的物理学家，包括希尔伯特、泡利、索末菲尔德、玻恩和外尔等人的兴趣和关注。德国格拉夫斯瓦尔德大学物理学家嘎斯塔夫·米，是对电磁纲领的后期发展贡献最多产、最杰出的人物。跟阿布拉汉姆和大多数纲领的早期支持者相反，米接受了相对论，充分利用了它的概念和方程。例如，洛伦兹不变性和四维时空的概念是米理论中的重要部分。然而，米充分赞同其先行者的物理观——即归根结底，世界是由电磁以太中的结构组成的。下面取自 1911 年的描述所给电磁世界观的实质，并表明：米的观点基本上是跟拉摩、维恩、洛伦兹、阿布拉汉姆等早期物理学家一样的。

基本的物质粒子……是以太中真正的奇异点，以太

的电力线聚集在那里。简而言之，它们是以太中电场的“节”。值得注意的是：这些节总是禁锢于一些封闭的极限内，即基本粒子所填充的地方。……可感知世界的、乍看来只是一种色彩缤纷、错落无序的展示整个差异性，显然归结于在一个单一世界物质——以太——中所发生的各种过程，而对于其一切难以置信的复杂性来说，这些过程本身满足少数简单的和数学透明的定律组成的和谐体系。（Vizgin 1994, 18 and 27）

米的理论原本是一个关于基本粒子的理论，1912~1913年间他将其发展成三长篇论文（合编132页）。他也想把引力纳入其中，但他想利用自己在物质理论中所用的相同方程来说明引力场却未获成功。

米相信电子是以太处于“一种特殊奇异状态”中的一个很小部分，并把它描述为由“一个连续伸向扩展至无穷远的电荷大气的核”所组成（Vizgin 1994, 28）。这就是说，严格说来，电子没有确定的半径。靠近电子的中心，电磁场强度会是巨大的，而且，米认为：在这条件下，麦克斯韦方程不再有效。为此，他发展了一组推广的、非线性的电磁学方程；在离电子核心相对大的距离上，它们对应于正常的电磁学方程。从米的基本方程可计算出基本粒子的电荷与质量，它们是被一定的“世界函数”表述的。这是一个瞩目的进展，第一次以数学精确的方式演绎粒子的场模型。有趣的是，在发展他的表述中，米利用了矩阵方法，这是应用数学的一个分支，后来进入到量子力学之中。可是，它的进展局限于数学纲领；当它面对实际的物理学时，这个宏大的理论却是特别贫乏的。到1913年，两个已知基本粒子——电子和质子——的性质原则上可以从理论中推导出来。哎呀，这还只是原则上的，因为进入方程的世界函数的形式是未知的；但相信米



纲领的人认为，成功可寄托于未来的进展上。

虽然米的理论从未导致所希望的结果，它不是没有后果的。它影响了爱因斯坦、希尔伯特、外尔和其他人的某些工作。而且，迟至 20 世纪 30 年代，马克思·玻恩重新考虑了米的理论，把它作为发展一个一致的量子电动力学的经典构架的候选者。1920 年前后，对于某些数学物理学家来说，诉求的内容不是米理论的细节而是米的精神和方法。如外尔 1922 年所说：“于是，这些〔米的〕物理定律能使我们计算电子的质量和电荷，以及个别元素的原子量和原子电荷。而迄今为止，我们总是接受物质的这些最终组成，而它们的数字性质是现给的。”（Vizgin 1994, 33）

统一理论的目标是在一个单一的理论方案中理解世界的丰富性和复杂性。例如，电子的电荷和质量通常被认为是偶然的性质，就是说，这些碰巧的事件就是发现的那个样子（被给定的事物），它们不能从物理定律中唯一地导出它们可能是一些不同于它们之表现的另外的状态。按照统一理论，电子的电荷和质量（一般地，一切基本粒子的性质）必须最终从理论得出——它们必须从偶然性转变为由定律支配的量。不仅如此，基本粒子的数目和种类也必须来自理论；不仅指任意给定时期碰巧发现的粒子，而且也指尚未发现的粒子。换言之，一个真正成功的统一理论应该能够预言基本粒子的存在——不比自然中存在的多，也不比它们的少。这是一个可怕的任务，特别因为物理理论不可避免地要依赖于经验所知道的东西，因而必然反映实验物理学艺术的状态。1913 年，电子和质子已为人知，因此，米和他的同代人按照这些粒子的存在设计他们的统一理论。但是，电磁学纲领的这些给人印象深刻的理论没有实际的预示功能。尽管它的宏大和先进的数学机制，米的理论是襁褓中的婴儿，全然没有为 30 年代所发生的、粒子雪崩式的发现做好准备。当嘎斯塔夫·米 1957 年逝世时，粒子与场的世界早已恍然不同于 1912 年的旧日风貌

了。对于他在世纪之初开创的那类大统一理论，这个世界要复杂得多，早已无人问津它们了。但是，在米逝世 20 年之后，现代各种大统一理论走到了物理学前台，激励着一种新的统一的世界观。在某种意义上，它同旧的电磁学纲领有一些共同的特征。关于这些现代统一理论的详情，参阅第二十七章。

第九章 | 工业与战争中的物理学

工业物理学

物理学并不仅局限于大学或类似机构中旨在更深入探究自然秘密而传授和培育的学院物理学。物理学的一个大而重要的部分还包括由为技术目的服务的应用物理学知识以及为这类目的服务的发展中的新概念、新理论和新仪器范围。对于技术的进步来说，应用的或工程的物理学常常是实质的。但只有极少的情况下新技术才直接由科学知识产生。在所谓基于科学的技术的大多数情形中，基本科学与技术之间的关系是复杂和间接的。

当然，物理学的应用不是一个现代的问题。恰好相反，从伽利略和培根时代起，物理学可以或将导致造福人类的技术革新的观念，就一直是物理学的历史的一个完整部分。然而，只到 19 世纪后半叶，它的实惠作用才达到值得重视的程度。当 19 世纪临近它的结束时，物理学可能具有跟化学一样重大的技术潜力这一点变得更加明显了。化学这门科学最早也更明显证明它具有生产力特征。这是当时增加对于物理研究的支持的一个重要的因素，也是许多物理学家共有的一个观点。埃米尔·瓦伯格是持这一观点的人之一，他是弗莱堡大学新建物理研究所的主任，1891

年在该所的就职典礼上，他说：“就物理学而言，所谓自然科学的崛起，表征了现在的时代，不在于发现或研究原理的数量和意义，它更多地归结于增长着的效应，科学将这些效应作用于民众的生活以及依赖其上的各分支技术。而且，我们必须补充说，归结于因此导致的反效应。”（Cahan 1985, 57）从那时起，越来越多的物理学家开始从事应用技术的或工业物理学的工作，分散在各私人工业、技术学院或非赢利机构之中。“工业物理学”在 20 世纪 20 年代腾飞，但甚至在第一次世界大战爆发之前，这类或那类非学院物理学在大多数国家中就已经牢固地确立了。

最适合于工业应用的物理学领域是热力学、电磁学、光学和材料科学等经典领域；“新物理学”——如放射性、相对论和量子与原子理论——并不直接导致大范围的实际应用。但是，像放射性这样新的和外来的领域甚至具有工业的意义。从事辐射标准的工作变成早期放射性测量专业实验室的一个重要部分。玛丽·居里传统被描绘成纯科学的女英雄，但她工作的纯粹性并不阻止她十分关注建立一个国际镭标准，并确实保持跟法国镭工业的联系。对于居里，工业定向的工作是她科学工作的一个自然和整体部分。从约 1905 年起，居里的实验室与化学工业家阿梅特·德·李瑟的公司存在着密切的联系。伸向实验室的工业维度和巴黎镭研究所开设的关于放射性的课程吸引着在工业中工作的科学家。一份最近的研究报道：“对于居里的合作者来说，过着科学与工业的双重生活，是寻常的事。”（Rocqué 1997b, 272）早期放射性研究的另一个大中心维也纳的镭研究所创建于 1908 年，服务于工业和计量学功能，类似于巴黎研究所干的事。维也纳物理学家与奥尔公司合作，该公司加工矿石以获得对科学和工业有巨大利益的、有价值的镭（以氯化镭的形式）。

柏林的帝国物理技术研究所，在维纳·冯西门斯和厄曼·冯亥姆霍兹的倡议下创建于 1887 年。柏林研究所的目的是把物理



学应用于德国工业，从而有利于国家的技术革新。因为，如西门斯致普鲁士政府的信所说：“在国家之间的竞赛中，现时如此主动地投入，谁最先立足于新的〔科学〕道路上，并最先把它们发展为确定的工业部门，谁就成为决定性的先手。”（Hoddeson et al. 1992, 13）亥姆霍兹，帝国研究所第一任主任，渴望把它变为一个研究机构，而不仅是一个把确定的知识被动地应用于解决工业问题的地方。他的继承人弗里德利希·科劳什，在1895~1905年的任内，极大地扩展了研究所，使之成为世界最重要的应用物理和精密测量中心。1903年帝国研究所拥有10栋建筑物，雇有110名员工从事41种科学工作。帝国研究所在激励和帮助高科技工业发展的重要性也被国外所承认，而且，其他国家也建立了类似的机构。英国的国家物理实验室（1898年）、美国的国家标准局（1901年），以及日本的物理和化学研究所（1917年），都是效法帝国研究所而建立的。虽然，大量基础的和应用的原创研究是在研究所进行的；但像测试一类的实际任务则具有更大的经济意义，而且要花费大量的资源。进行大量的测试，特别是温度计与电灯泡的测试（例如，在1887~1905年间测试了15万个温度计）。这些常规工作造成了帝国研究所理论研究水平的下降状态，有才能的科学家纷纷离开研究所直奔各个大学，这一点在埃米尔·瓦伯格的主任期内（1905~1922年间）尤为明显。

应用物理学在私人工业中的应用，在美国不是很发达的。美国在20世纪初建立了几个工业研究室实验室，主要在电器业。跟传统的测试与性质控制相反，科学研究在各新实验室中拥有主宰权，那里通常配备有通过大学训练的、具有博士学位的人才。也跟许多欧洲国家的情形不一样，在美国，学院物理学家与被工业雇佣的物理学家之间有着密切的接触。学院物理学家常作为顾问为工业工作，而应用物理学家常撰写科研学术论文。纯物理学与应用物理学的论文有时难分伯仲。1913年来自工业实验室的物

理学家约占美国物理学会成员中的 10%；7 年后，总会员数翻了一番，他们约占其中的 25%。工业实验室的科学重要性可以从《物理评论》论文的百分比中得到进一步的证实。1910 年只有 2% 的论文来自于工业实验室；5 年后，比例急速地上升到 14%，而在 1920 年，数字上升至 22%。最具有研究强度的公司是两个电技术巨人，通用电力和美国电话与电报公司（AT&T），它们对纯物理学的贡献比许多大学还多。这两个公司的科研强度可以从 1925 ~ 1928 年间的数字得到说明：27 篇《物理评论》的论文来自通用电力；26 篇来自贝尔电话实验室，它是 AT&T 的研究分支。比较起来，哥伦比亚大学贡献 25 篇，耶鲁 21 篇（加利福尼亚技术学院排第一，75 篇）。在那时，贝尔实验室是世界上最大和最富有的工业研究机构：拥有 3 390 名技术人才和一个约 600 名科学家与工程师的研究队伍。贝尔实验室开创了大科学的时代。1926 年 AT&T 的研究和发展经费按 1948 年量度，从 1916 年 610 万美元，增长到 1920 年 1080 万美元；1926 年费用是 1660 万美元，1930 年这数字增加到 3170 万美元。（尽管这些数字已有相当规模，它们只是 1945 年以后出现的甚至更具爆炸性的发展的前兆。在 1981 年 AT&T 被法令命令分裂成几个较小的、独立公司之前不久，贝尔实验室雇员数目是 24 078 人，其中 3 328 人具有博士学位。该年，AT&T 提供给贝尔实验室的经费不少于 16.3 亿美元。）

虽然 AT&T 是个例外，它只是越来越多的、雇佣科学家的公司当中的一个。到 1931 年，1 600 多家公司向国家研究协会报道实验室雇员近 33 000 人；9 年后，2 000 多家公司有研究室雇员约 3 万人。

欧洲尾随美国所形成的趋势，但步伐和强度都不及美国。相对少的英国工业实验室的物理学家不太为纯物理学文献撰写论文。最大的欧洲电技术公司，德国的西门子公司公认具有应用科



学价值，但没有可跟美国对手相比拟的中心研究部门，只是在1920年，在受过哥廷根训练的物理学家汉斯·格尔蒂恩的领导下才建立了这样的部门。这个新的研究实验室发行它自己的期刊《西门子公司学术刊物》，它在范围和内容上类似于《贝尔系统技术期刊》。可是，西门子期刊并不具有跟其美国对手相对应的重要性。我们现在考虑应用物理学的两个重要的案例，它们都相关于电子学的状态。

电子在运作之一：长途电话

亚历山大·格拉厄姆·贝尔的电话公司并非科学的产物。在电话公司的头20年，新的远程通讯以一种经验的方式发展着，只受1855年威廉·汤姆孙开创的电报理论的指导——而且是错误的指导。当证明几百千米以上的音质良好的传输难于实现时，工程师们提议减低电线系统的电阻与电容，并且，逐渐相信自感是一个有害的量，而将铁导线改为铜导线可减少这个量。可是这种扩展通话距离的办法效果相当有限，而且，到19世纪90年代中期，电报工程师的经验方法绝不会产生长距离好质量的通话这一事实已变得越来越清楚了。应用基于物理学的更科学的程序的时机来到了。

其实，这些程序早在1887年就一直被应用着。当时，法国的埃梅·法希和英国的奥利弗·海维赛德利用基本电学理论理论上分析了电话电流的传输问题。他们得到了稀薄与畸变随导线电参数变化的公式，并得出自感有益的结论：一条导线自感越高，性能越好。法希和海维赛德的工作很久以后才导致实际的方法，并且，海维赛德以科学为基础的举荐在英国受到有权势的邮局工程师的阻挠。法希-海维赛德理论首次被转变为一种实际的技术，是在美国以及小范围地在丹麦。

在贝尔实验室的早年岁月中，科学研究未被赋予很高的优先权。但是，哈蒙德·哈耶斯，一位贝尔雇员，受过大学训练的物理学家，要求公司对研究给予更大的重视。1897年他雇佣乔治·坎普贝尔发展由海维赛德提议的那种高自感的电缆。在他的进路与训练中，坎普贝尔有别于那些习惯于电报与电话技术的工程师和技师，而这种差别对于成功是至关重要的。坎普贝尔有在MIT、哈佛以及3年在欧洲师事于名师庞加莱、玻尔兹曼和费利克斯·克莱因获得的对于理论物理的强大背景，透彻地熟悉法希-海维赛德的工作。坎普贝尔运用他的数学技巧发展一种电缆（或天线）理论，“配置”离散安置的自感线圈。1899年夏，他完成了对于配置有线圈的导线的数学分析。它预示在何处配置电流线圈，负荷多大，以及电缆与线圈之间最有效的网分布。坎普贝尔意识到技术问题不可能通过经验方法获得解决，而利用理论手段克服这些问题将是公司的利益所在。如1899年他在一份备忘录中写道：“尽可能多地使用理论，尽可能少地尝试各种方法，就是经济学。”（Kragh 1994, 155）坎普贝尔的革新具有实际的目标，但并不为此而减少实用价值。1903年坎普贝尔不是在工程期刊，而是在卓越的物理期刊《哲学杂志》上发表他的配置理论。

一个类似的结果同时独立地被迈克·普平获得。他是哥伦比亚大学电气工程的塞尔维亚血统教授。跟坎普贝尔一样，普平有一个很强的理论物理背景（他曾师事于基尔霍夫和亥姆霍兹），而且，对于仍然主宰工程专业的试试改改方法没有信心。他的优越于坎普贝尔之处是他是一位大学研究者，而不是一位公司雇员，并因此于1900年，出类拔萃地设法为他的线圈配置理论获得一项专利。在一场扩展的法律辩论之后，AT&T购买了专利的使用权。普平的（或被称为“普平化”）德国专利同样被西门子-哈尔斯克公司所购买。

第一条线圈配置线是1901年建成的；在接下来的10年里，



在美国和欧洲配置系统成为大数量长程传输线的脊骨。以坎普贝尔和普平的工作为基础的革新是一个巨大的商业成功，也是对于理论物理学的有用性的巨大宣传。到 1907 年末，贝尔电话集团公司安装了 13.8 万千米的配置了 6 万个载荷线圈的缆线；4 年后，线圈数增加到 13 万个，公司估计从感应载荷线圈的投资中节约了约 1 亿美元。物理学家和化学家在美国载荷系统的发明和发展中起着主导作用，他们在欧洲也一样起着主导作用。在欧洲，德国公司是这领域的领导者。第一条配置有普平线圈的欧洲电话线，是 1902 年以奥格斯特·埃贝林和弗里德里希·多勒泽勒克的实验为基础，由西门子-哈尔斯克公司制作的。埃贝林和多勒泽勒克的例子说明了工业物理学与学院物理学之间交往的增加。埃贝林曾师事于亥姆霍兹，同维纳·冯西门斯共过事，在成为西门子-哈尔斯克公司中一名领导工程师之前，在帝国研究所度过了 5 年的时间；多勒泽勒克曾师事于能斯脱，并在西门子-哈尔斯克公司呆了几年之后，回到了学院替代他原先的教授，担任哥廷根大学物理化学研究所主任。在德国和大多数欧洲国家中有另一个重要角色没有登上美国舞台。那就是政府机构。德国远程通讯技术得到帝国邮政的支持，它有自己的高规格的研究人才班底。它的帝国电报检验部创建于 1888 年，包括弗朗兹·布列斯格，原为亨利希·赫兹的学生，可能是欧洲精通电通讯理论的主要专家。

普平化，或线圈载荷，是延伸通话域的主要方法，但不是唯一方法。对于电缆，特别是海底电缆，替代方法是把铜导线紧紧地绕在软铁上。这种连续载荷的思想可追溯到海维赛德，但经过了 15 年，这一思想才演变成一种实际的技术。它是由一位丹麦工程师卡尔·E·克拉鲁普完成的。他设计了第一条海底电缆，铺设在丹麦与瑞典之间。克拉鲁普曾经是乌兹伯格大学威廉·维恩的研究生，是另一个经科学训练的、新一代工程师。克拉鲁普

型的连续电缆广泛使用了 30 年——例如，1921 年，用在 190 千米的西部至哈瓦那的主干电缆线上。

随着载荷方法的成功，尽可能有效地设计鲁平线圈变得重要了，就是说，利用最大的磁渗透性和最小的因涡旋电流造成的能量损失。对于电信企业，材料科学变得至关重要。早在 1902 年，多勒泽勒克就获得了一项关于感应芯的专利，它由仔细分离的铁粉末与绝缘胶合材料混合而成。但是，只在 10 年之后，这项专利才转变为一项发明。1911 年，AT&T 在它的西部电器工程部组织了一个团队，旨在把基本科学系统地应用于电话问题。1916 年铁粉芯的发明就是新研究纲领的早期成果之一。这些成果迅速地在伊利诺斯州豪索那的西部电器生产厂投入商业生产。到 1921 年，该厂每周生产 25 000 磅铁粉。与此同时，西部电器研究者设法找到了用优质磁性载荷材料来替代铁。瑞典出生的嘎斯塔夫·埃尔门发展了一种加热与冷却镍-铁合金的方法，这样，通过冷热处理的合金磁性高、耗热低，称为“高磁合金”，约 20% 的铁和 80% 的镍。20 年代这种合金取代了鲁平芯中的铁。到 1930 年，AT&T 公司每年生产 100 万个以上的高磁性合金的芯。

高磁性合金用作横越大洋的电报载荷材料，是十分重要的。为此，西部电器工程部主要由奥里弗·布克莱发展了一个可靠的理论。他是一位受过康纳尔教育的物理学家，1914 年加入公司，从事真空管与磁性材料的研究。经过许多理论与实验工作之后，获得了一个实在的理论，可用来指导高速载荷电报缆线的构造。当纽约与亚速尔群岛之间 3 730 千米的电缆被西部联合电报公司运作，被一家英国电缆公司生产，于 1904 年调试时，它达到了一切期待的目标。非常高的速度超过了已有的终端设备和其后的特别高速的其他记录装置。这个以及高磁性合金载荷电缆的成功复苏了横渡大洋的电报业，并再一次证明物理研究的实际与经济价值。1924 年，反映其作为贝尔系统的研究员生涯，坎普贝尔总



结说：“电学现在是数学主宰的一个领域，而且，电学中的一切进展都是通过数学实现的。”

电子在运作之二：真空管

电子管（即无线电管或真空管）是 20 世纪最重要的发明之一。它的历史要追溯到 1880 年，当时爱迪生注意到：当一块导板进入一个他新近发明的电灯泡之内时，有一股小电流从灯丝流向导板。爱迪生效应吸引了电器工程师们的兴趣。其中一位是英国人约翰·阿姆布罗斯·佛莱明，1889 他演示：从灯丝发射的粒子是负电粒子。10 年以后，人们意识到这些粒子是电子。1904 年，佛莱明当时是伦敦大学学院电器工程的教授，兼马可尼无线电报公司的技术顾问，他发现用于爱迪生效应的灯泡可用作高频电磁波的探测器。佛莱明制作了第一个真空管，1905 年被马可尼公司获得专利的二极管，但这项发明不是一个成功。二极管被证明过于灵敏不可实际用做无线电报的探测器；取代的是，美国人李·德福雷斯特做了第一个实际的真空管。虽然，开始时不是很大的商业成功；1908 年，德福雷斯特发明三极管（或“三极检波电子管”）是电器时代的起始点。奥地利的罗伯特·冯里本，电子管的另一位开拓者，制作了二极管，后来制作了用作电话放大器的三极管。当时，名称“真空管”是个误用名，既不是为了德福雷斯特和里本，也不是为了其他一开始就认识到高真空很重要的人物。德福雷斯特原先的三极管的确是个真空管，但不是高度真空；他以为残存的气体对于管子是实质性的。1910 年，里本的管子只是部分地抽空，并充以稀薄的水银蒸汽。

1912 年通过私人公司的研究真空管转变为种种技术奇迹。在这领域 AT&T 的专家是哈罗尔德·阿诺尔德，一位被芝加哥的密立根看中、刚获得博士学位的青年物理学家。当德福雷斯特向贝

尔电话公司演示他的三极管时，阿诺尔德意识到：这个粗糙的装置可以发展成一个高功效的放大器或继电器。他很快地制作一个改进了的装置，特别利用了德国沃尔夫冈·盖德发明的新高真空泵，把真空管彻底地抽空。（真空管电子学以及应用与实验物理学的其他部分，严格地依赖于真空技术的进展。）虽然早期真空管是“软的”——不是高真空——但贝尔实验室的工作产生了“硬的”三极管，在其中电流纯靠热离子而不靠离子。阿诺尔德和他的团队所做的其他改进，包括用套在氧化钙或氧化钡罩内的阴极替代热灯丝；这样的阴极，首先由德国物理学家阿瑟·维内尔特于1904年制作出来，能够在较低温度下运作，从而延长了管子的寿命。花了快一年的时间，合用的真空管中继器才被发展出来。这些中继器是1913年在纽约-华盛顿电报线路上测试的。两年后，在确保纽约与旧金山之间的第一条跨大陆电话通讯的稳定性中，它们被证明具有商业价值。罗伯特·密立根参加了线路开通典礼，他在自传中写道：“从那天晚上开始，电子——在那以前主要是科学家的玩物——清楚地进入了专利机构供给人们商业和工业需要的领域……电子放大管现在是整个通讯技术的基础，反过来，这至少部分地使得将其应用于上十种别的技术成为可能。”（Millikan 1951, 135）密立根并未提及真空管技术的真正突破是由于第一次世界大战期间的需要。当美国1917年参战时，国家每周生产400个管子；两年后，产量是每周8万个。

德国的发展是跟美国平行的，但不如美国发展快速和顺畅。四个最大的电器公司（西门子-哈尔斯克、通用电器公司、费尔顿-古勒梅和泰勒范克）组成财团，获得了里本专利，以发展其商业利益。因为过于看重里本型充气管的失误。德国人花了两年才认识到未来属于高真空；那时，泰勒范克开始生产真空三极管。在战争期间，德国加速开发理想真空管技术（其他交战国也一样）。从事真空管研究的一位物理学家是瓦尔特·肖特基；他



是普朗克的学生，拥有广义相对论与电子学的知识和才能。业余时间，肖特基在西门子-哈尔斯克上班，他发展了一种改进了的真空管，在阳极与正常的栅极之间加一个栅极。虽然肖特基在这领域的工作没有导致一个实际的真空管。但它仍是重要的，因为它包含了对于真空管基本物理学的研究，从而导致离散噪音效应的发现。肖特基在一本《今日的经典信息论》中说明了这一效应。肖特基的洞识被后来的研究者们大大地发展了，特别是哈里·尼奎斯特（1928年）和克劳德·申农（1948年），两人都是贝尔实验室的。

在美国，真空管技术不仅为 AT&T，而且为通用电器公司所关注。1912年，威廉·库里吉，经大学训练的物理学家，在通用电器研究实验室工作，发展了第一批钨丝白炽灯泡，并开始改进 X 射线管。他的助手伊尔文·朗缪尔，在哥廷根能斯脱手下学习过物理化学，在那里也听过菲勒克斯·克莱因的数学讲座。在美国一所技术学院当了几年教师之后，1904年朗缪尔来到通用电器公司，一呆就是 40 多年。他是第一个获诺贝尔奖的公司聘用的科学家，也许是唯一以山峰命名的人——阿拉斯加的朗缪尔山。在通用电器公司，朗缪尔开始一项关于在气体和真空中放电的研究计划，他提议把惰性气体充入灯泡中，以延长灯泡的寿命。这一发现很快转变为一项高利润的发明。与此同时，他研究了电子在真空中的发射，以此作为真空管的一种机制。朗缪尔意识到：二极管与三极管的实质进展就是电子的发射，它要求高度真空。在那以前，跟新管子打交道的工程师们很少知道它们的运作机制，虽然电子从热物体发射的一般理论，一直被英国物理学家欧文·理查逊从 1901 ~ 1903 年的著作中一再论述。

理查逊，J·J·汤姆孙的学生，电子学理论专家，1909年创造“热离子”一词，并表述了热离子发射率与金属的温度之间的经验公式；在接下来的 10 年里，他努力检验与完善“理查逊定

律”，理查逊的唯象理论，逐渐地被认为是对于真空管的科学说明。但在真空管的形成岁月里，1904 ~ 1908 年间，它的作用并不明显。只到后来理论才变得对于真空管具有基本的重要意义。

当理查逊 1929 年获得诺贝尔奖时，卡尔·奥辛在授奖演说中强调理查逊的纯理论工作与通讯技术的惊人进展之间的密切关系：

那些从事电子技术研究的科学家们力求解决今天的大问题，他们当中有这样一位，他努力使人们不论自身处在世界的什么位置，都能和这个世界保持联系。1928 年他的努力达到了这样的境界，我们能够开始建立瑞典与北美之间的电话通讯。……每一位拥有真空管接收器的人都知道真空管在仪器中的重要性——真空管，它的实质部分就是发光的灯丝。……最重要的事实是，理查逊关于热离子有确定的定律的见解完全得到了证实。这一事实为这一现象的实际应用奠定了坚实的基础。理查逊先生的工作正是那种我刚才说过的导致世界进展的技术活动的出发点和基础。

奥辛把理查逊的工作评价为技术奇迹随之接踵而至的科学基础，是夸大其词了。1913 年真空管技术很少依赖于科学理论，而且，理查逊本人表示对于技术问题没有多大兴趣。在他的获奖讲演中，他既未提及真空管也未提及他被认为是其科学之父的电子技术。但是，朗缪尔是非常熟悉理查逊理论的，它使他彻底地理解了真空管的运作。特别地，朗缪尔确证了理查逊关于热离子电流的表达式，并最后证明电子的发射不需要残存气体。朗缪尔对二极管的科学理解是通用电器公司发展真空管的一个重要因素。由朗缪尔和他的同事绍尔·杜什曼领导的通用电器的研究者们，



1917年有了他们改进了的高真空管。其结果之一是与AT&T讼争的延长专利。

获1937年的诺贝尔奖的电子衍射的发现，它起源于跟阿诺尔德-朗缪尔讼案相关的研究。克林顿·戴维逊，一位理查逊的博士生，1917年加入西部电器工程部。两年后，他和他的助手列斯特·格尔梅开始研究维内尔特阴极的热离子发射。虽然这项研究不像阿诺尔德和戴维逊原先相信的那样影响讼案的结局，它最终以一种令人满意和出乎意料的方式发展。在他们的扩展研究计划中，戴维逊和格尔梅研究在电子的轰击下电子从金属表面的发射。这些电子散射实验产生的图样，戴维逊将之解释为出自于金属的晶体结构。但是，似乎没有进一步的东西来自实验。贝尔的物理学家不视电子为波。仅仅在1926年春，戴维逊在英国度假，偶尔听到路易斯·德布洛意1924年关于电子可能被晶体衍射的思想。在当时，戴维逊并不知道新量子力学，但他被欧洲的同事们告之，薛定谔理论可能是理解他的实验的关键。在一封致理查逊的信中，他写道：“我仍在向薛定谔和其他人学习，并相信我开始得到一切相关东西的某种概念了。我特别认为，我知道用我们的散射实验仪器来检验理论所应该作的那类实验了。”（Russo 1981, 145）

旧研究计划的新方向导致著名的戴维逊-格尔梅实验，实验证明了德布洛意公式：以速度 v 运动的电子可以被赋予一个波长 $\lambda = h/mv$ 。这项发现的详细报告恰如其分地发表在1927年4月的《贝尔实验室记录》上。10年后，戴维逊与乔治·P·汤姆孙因该项发现而接受了诺贝尔奖。

化学家之战中的物理学

直到1914年4月第一次世界大战爆发之前，大多数科学家都

把自己视为超国家群体——学者共和国——的成员。那里，国家意义没有科学成就重要。可是，当超国家意识跟战争的现实相冲突时，它几乎立即崩溃，迅速转化为一种沙文主义。这种沙文主义的原始性在欧洲各国中不亚于其他群体所信奉的各种主义。在1914年底之前，现实战争导致的一场意识上的战争就已经硝烟弥漫——一场由科学家和其他学者参与的文字之战。物理学家不再仅是物理学家——他们现在是德国物理学家、法国物理学家、奥地利物理学家或英国物理学家。学者之战的一个重要因素，是由93名德国科学家和艺术家签发的1914年10月《致文明的世界》宣言，力图证明他们军队行动的合理性，这包括进攻中立国比利时及摧毁其中部城市鲁文。在这份宣言中，自称为德国的“真理先驱们”否认德国发动了战争，否认德国士兵有文明国家军队所不指望的无纪律与无廉耻。对于德国科学家来说，军国主义与德国文明密不可分：“如果不是军国主义，德国文明早就根绝了。……忠于我们吧！请相信，我们作为一个文明国家，将把这场战争进行到底。对于这个国家来说，歌德的、贝多芬的和康德的遗产跟我们的生命和家园一样的重要。”（Nicolai 1918, vii）在宣言上签名的有几个德国物理学家和化学家的领军级人物，包括普朗克、能斯脱、奥斯特瓦尔特、哈伯、勒纳德和伦琴。爱因斯坦是反对战争和一般沙文主义氛围的极少数物理学家之一，没有签名。相反，他在一份由生理学家乔治·尼可拉起草的、主张和平与合作的反战宣言上签了名。可是，这份《告欧洲人书》的宣言不成功：只有四人签了名。

德国宣言激起了英国和法国科学家的尖锐回应。例如，巴黎科学院终止了签了名的德国科学家的外国院士资格。不久，法国学者攻击他们的同事跨越莱茵河，攻击他们主张的一切，或法国认为他们主张的东西。虽然，德国人被承认是科学的良好组织者，但按照法国人的宣传，他们缺乏原创性，只是遵从和发展别



人创造的合适思想。在某些情况下，法国科学家认为德国科学内在不同于，当然劣于，像法国一样的文明国家的科学。按照物理学家与化学家皮尔·杜罕的说法，德国科学有其自身的特征，带有德国人种悲惨精神特征的印记。德国物理学家就是不能直觉思维，缺乏那种把抽象的物理理论跟现实世界连接起来所必要的常识观念。作为抽象的德国理论化的典型例子，杜罕提到相对论以及把光速作为极限速度的荒谬假设。另一个作家，生物学家，挑选量子理论作为德国“数学形而上学的胡说”。在1916年的一本书中，他写道：“相对论是科学演化的基础，它顶多等同于艺术中的未来派和立体派……我们在马克思·普朗克的量子理论中找到了这种数学形而上学胡说的一个好例子。这位柏林的物理学教授，莱茵河那边93名知识分子当中的一个，普朗克……引入……热原子，光原子，力学能(!)，事实是一般能量原子。作为相对论的结果，这些原子甚至具有质量，被赋予惯性(!!)。”(Kleinert, 1978, 22) 那是一种讽刺，法国爱国科学家1916年圈为德国思想类型的理论，就是20年后纳粹德国科学家圈为非德国的犹太人思想原始典范的相同理论。在1914年10月《自然》的一篇文章中，威廉·拉姆齐，诺贝尔化学奖得主，写道：“德国理想一开始就是远离真正科学人的概念的。”虽然，拉姆齐承认个别德国科学家的辉煌，但作为一个整体，没有德国人世界科学也可以顺畅地进行，“科学思想的最大进展从来不是由德国人种作出的”，他写道，“迄今为止，如我们希望看到的，世界正在从条顿人的泛滥成灾的平庸的制约中释放出来。”

当战争宣布时，交战国的许多科学家向军方表示，他们可用其所长为国效力。可是，政治与军事当局不乐意接受这种要求；而在许多情形中，他们选择不予理会。传统上，军人对于科学研究的实用性持怀疑态度，特别对民间科学家所做的研究。在德国和奥匈帝国，青年科学家跟普通士兵一视同仁，在战场上干相同

的事。在战争的早期，没有雇佣物理学家或其他科学家作战争项目或发挥他们专长的事。这是后来才有的，虽在战争中增加了对于科学重要性的认识，它仍然维持在一个有限的水平上。德国战时最大和最著名的项目是化学毒气战争的项目。它由弗里兹·哈伯领导，他雇佣了几个物理学家。詹姆斯·弗朗克、奥托·哈恩、埃尔文·马德隆、嘎斯塔夫·赫兹，时间长短不一地参加了这个项目。哈恩在柏林的凯撒·威廉研究所实验毒气，在列夫库松的贝耶化工厂研制了新的毒气。雇佣物理学家的另一个军事研究所，是柏林的阿提列里检验委员会（APK）。这里考察量程的各种方法——光的、声的、地震的和电磁的。战争期间，马克思·玻恩有一部分时间在 APK 工作。阿尔弗雷德·兰德、弗里兹·瑞奇、费迪纳德·克尔鲍姆和鲁多尔夫·拉顿伯格也一样。利用声音量程判断敌军火炮阵地的方法出自拉顿伯格骑兵上尉，他得以劝说军队建立一个科学团队从事这一工作。其他的事有：玻恩利用哈密尔顿力学方法研究风随高度变化对声速的影响。“我认为这是一项好的应用数学，”玻恩回忆说。（Born 1978, 171）

还有另一些科学家研究远程通讯问题。这个问题原先是被德国军队忽视的。吉纳大学的物理教授马克思·维恩组织了一些物理学家与工程师从事飞机上应用无线电的研究。有一段时间，索末菲尔德研究利用检测沿地面传播的弱“地表电流”探听敌方的电话通讯。基于索末菲尔德研究的真空放大窃听装置可探测到离电话线一千米范围内的信号，证明对德军具有相当的价值。（对于索末菲尔德来说，科学与技术研究不是一个陌生的领域。他早年发表过论电学技术问题与润滑流体动力学的论文。）

在英国，科学与技术的动员以 1915 年夏建立科学与技术私人协会委员会为起点。第二年，这个委员会改名为科学与工业研究部（DSIR）。DSIR 的目的是促进、设立基金和协调具有工业与军事意义的科学与技术研究。虽然它的目的是生产诸如化学品与



光学玻璃等有用产品。DSIR 认识到这目的需要对纯科学的投入。如 1916 年《自然》所说：“忽视纯科学就好比耕作与施肥于一块土地，而不播下种子。”国家物理实验室自 1902 年起就在皇家学会的监管之下，1918 年被转并到新的部门。战争爆发时，实验室使用 187 名雇员；在接下来的 4 年中，军事定向的工作被给予优先权。到 1918 年底，国家实验室的雇员增加到约 550 人。DSIR 是最重要的英国早期科学政策决策部门，并在物理学与其他科学方面为尔后三四十年培植了栋梁之才。跟它的德国对手一样，英国物理学家也涉足于检测与发展量程方法。威廉·H·布拉格和其他物理学家考察了用声量程法给壕沟背后的德军火力定位。在军需品发明部，拉尔夫·弗勒和年轻的爱德华·米尔恩研究引导防空火力的光学仪器。

对于英国甚至更为重要的一个问题，就是德军潜艇的威胁。皇家海军发明与研究委员会（BIR）管辖这一领域的研究。它创办于 1915 年。卢瑟福是从事发展对付可怖潜艇的探测手段的几个物理学家当中的一个。他把他的曼彻斯特实验室部分地改造成大水池，在那里做他的实验。按照卢瑟福的传记所言，不仅他向海军部的系统报告上印有“水下战科学的诞生”的字样，而且，“卢瑟福在 1915 年关于潜艇搜索所讲过的话，80 年代依然有效。”（Wilson 1983, 348）卢瑟福告诫，声纳探测是潜艇定位唯一实际有效方法。他和其他科学家大力发展有效的“水声学”以及其他的听力仪器。这条工作思路，与法国保尔·朗之万的不约而同，后来发展成声纳技术。声纳的发现有时要追溯到卢瑟福与朗之万的战时工作。

跟英国的情形一样，战争诱发美国政府制定科学规划。1916 年 6 月国家研究协会（NRC）创建起来，旨在组织与促进“国家安全与战争”研究。也跟英国一样，潜艇探测被给予高度的优先。密立根被聘为 NRC 的反潜艇委员会主席。在这领域，美国人

的工作在某种程度上是协调法国和英国更先进的工作。1917年6月，法国-英国一个有卢瑟福参加的会议，邀请其美国同事。虽然美国研究在探测与火炮量程方面较其同盟者差，它在通讯方面却是优秀的。当战争于1917年4月宣布时，美国军队委任AT&T的约翰·卡提并选用许多别的科学家和工程师作为通信部队的官员。卡提组建了一个科学与研究部，这个部以密立根为头，成员是来自大学和私人企业的科学家与工程师。在几个月里，AT&T供给了4500名工程师和操作员，组成14个营，从而通信部队扩展了3倍。美国军队的通讯系统的效率（在有线和无线两方面）依赖于奥里弗·布克莱的真空管技术。这位AT&T的物理学家负责通信部队的巴黎实验室。

与第二次世界大战——“物理学家之战”——比较，在第一次世界大战中，物理学家起着较小的作用，第一次世界大战可正规地称作“化学家之战”。物理学家的贡献不具有决定的重要性，而且，卷入战事的那类物理学跟物理科学前沿研究联系很少。但是，这是物理学在历史上第一次显示自己在军事冲突中的作为。如果物理学应用于安全目的，政府的支持是必要的。虽然，军事物理学到1918年就已经确立；谁也没有想到物理学会在20年后起到关键的作用，而且，更没有想到的是：在50年代美国主宰的物理学世界中，物理学的军事化竟然变成如此显著的一个特征。

第二部分 从革命到坚实

第十章 | 德国共和中的科学与政治

20 世纪初叶，德国是领导世界科学的国家；在许多方面，它为别的国家起着示范作用。物理学以及其他精密科学在德国有其渊源。1918 年对于德国和世界的历史都是一个分水岭。伴随战争的失败和侮辱性凡尔赛条约而来的，是国内骚乱，粮食缺乏，政治斥诸暴力，国家经济急速崩溃，以及持续到 1923 年的过度通货膨胀。当时，一片黑面包卖到 5000 亿马克（——译者注，原文如此）。然而，尽管这样，德国物理学在艰难度日的同时，成功地维持他们高水平的国际地位。在某些新而兴奋的领域内，如原子与量子理论，是由德国物理学家谱写国际议事日程的。量子力学的种子就是在德国共和的初期，在重重困难和悲惨的生活条件中而播种生根的。

科学政策与经济支持

战后德国科学共同体保持原样，但它是一个渴求金钱的贫困共同体。不仅德国在战后最初岁月里是个相对贫困的国家，而且，它的科学也被排斥在国际合作之外，缺乏外来通币加重了困难，因为购买外国文献与仪器几乎不可能。各大学见证了学生人数剧增。他们许多是过去的士兵，他们没房住、没老师教、没钱



花。学院预算远远不及战前水平，科学人员的薪水也一样；由于通货膨胀，积攒的钱天天贬值。奥托·哈恩撰文回忆他在1923年如何跟马克思·冯劳厄到德国南部度过一周假的：“在旅游结束时劳厄发现差了100万马克的住宿费，我借给了他。几年后，马克的价值已贬得面目全非，我时常提醒他，他仍然欠我100万马克。最后，他给了我一张面值15兆马克的支票，说全在这里，包括单利复利。”（Hahn 1970, 137）

德国领军级的科学家们意识到，他们需要以新的方式使其科学合法化，既要满足他们自己，又要更有信服力地诉求于政府赞助者。德国战败了，皇帝垮了，旧的好日子没了。剩下什么把德国引向新的辉煌与尊严呢？许多科学家的回答就是——科学。在一封致普鲁士科学院的信中，马克思·普朗克清楚地发出了这个信息：“如果敌人从我们的祖国夺走了安全与政权，如果严重的国内危机迎面袭来，或许还有更严重的危机等待着我们。有一样东西是国内外敌人没有从我们身上夺走的，那就是，德国科学在世界上所占据的地位。此外，作为这个国家的最卓越的科学机关，我们科学院的头等使命，就是维持这种地位，如果需要就利用一切可行的手段去捍卫它。”（Forman 1973, 163）这是在青年德国共和中经常听到的一篇檄文。普朗克当时以德国科学的非官方发言人的身份，重复着1919年一篇新闻稿中的一条信息：“只要德国科学能按旧有方式继续，如果德国会从文明国度行列中被除名，那将是不可思议的。”（Heilbron 1986, 88）科学应该被支持，普朗克说，主要不是因为它会导致技术和经济的进步（虽然这也是一个论据），而是因为它是德国文化的首要源泉。科学应被视为文化的一种载体，德国文化的载体。国家引以为骄傲的东西，是政治与军事的一种储备，这种储备已不复存在了。科学被视为储备国家尊严的手段，跟国家的诗人、作曲家和艺术家一样，科学家变成国家与国际文化政策的工具。

诉求科学的文化与政治的价值，不仅仅只是少数科学家寻求支持的托词，在传统的科学功利合法论的观点中，它奇怪地与许多政治家和人类学家主张的反功利和反物质的科学观相吻合的。在争取国际文化认可的斗争中，最宝贵的人物或许是爱因斯坦。他作为德国的人力财富，只要留在德国，就可以为宣传的目的加以利用。普朗克和别的人唯恐爱因斯坦可能离开德国，认为那不仅对于德国科学而且对于德国的文化政策是一大损失。在一份1920年9月2日德国驻伦敦领事致柏林外交部的报告中清楚表达了这一忧虑。当谈及英国有谣言传出爱因斯坦可能离开德国去美国之后，德国领事继续说：“尤其在这时，爱因斯坦教授被视为第一流的德国文化因素。由于他的名声甚广，我们不应该把这样的人赶出国门；我们可以利用他做有效的文化宣传。如果爱因斯坦教授确实有离开德国之意，那么这位著名的学者被说服留在德国，我断定那是有利于德国的国外声望的。”这个报告只是许多报告中的一份。每当爱因斯坦出国旅游讲演，德国大使馆或领事馆的一名官员就会秘密地向柏林报告。来自巴黎、哥本哈根、东京、马德里、奥斯陆、芝加哥和别的地方的报告，特别注意出版物如何把这位著名的物理学家与德国联系起来。一位蒙得维的亚的德国外交官1925年6月4日十分满意地报告，因为爱因斯坦“是作为一名‘德国学者’（他同样持有的瑞士公民身份则很少被提及）被欢迎的，他的访问对于德国事业一直是最有价值的”。（Kirsten and Treder 1979, 207 and 234）

在德国威廉时期，科学院主要由德国国家（大学属于国家）而不由柏林的联邦政府作财政支持。在1918年以后的悲惨条件下，为了避免饿死人，德国的科学机构必须寻找新的赞助资源。最重要的新科学-政治中心机构**德国科学的非官方组织**（德国科学与奖学金紧急协会）建立于1920年。这组织代表几个德国科学机构，包括威廉-皇帝官方组织、各大学与学院、科学院，以及



德国科学家与医生协会。非官方组织的主要活动为各种研究——自然科学、工程技术、社会科学和人类学——筹集与分配经费，并独立地接受大学分配奖学金。申请由专家小组评定，不受政治干预。从1922~1934年马克思·劳厄是物理组的主席，它是一个对德国科学政策有影响的职能。非官方组织的绝大部分资源来自柏林政府，但也有来自外国的实实在在的赞助，包括美国洛克菲勒的捐赠。只有一小部分来自德国工业，它喜欢支持有竞争力的亥姆霍兹协会或更具有技术性的个人科学项目。

非官方组织由柏林科学家控制，就物理学而言，它偏爱于普朗克认为具有文化（因而在他看来具有政治）意义的那类纯理论物理学。作为一名非官方组织的执行委员，普朗克坚持哥廷根和慕尼黑应该有足够的基金。可是，大部分研究奖学金一般给了柏林的物理学家。例如，在1924~1926年间，柏林物理学家得到了一半的奖学金。这事激怒了首都之外的许多保守的物理学家，他们控告非官方组织是拍柏林的马屁。在整个20年代，约翰尼斯·斯塔克和其他保守的物理学家谋求增加对于非官方组织的影响力，但遭到劳厄和普朗克的顽强抵抗。尽管非官方组织偏爱现代物理学，它有足够的经济实力，所以也宽宏大量地支持像斯塔克、勒纳德和鲁多尔夫·托马斯雪克等反相对论者。

电器物理学委员会是非官方组织的分支委员会，以通用电器公司的赞助为基础。它对于德国原子物理学具有实质的意义。1924~1925年间它接受了140名奖学金申请者当中的71名。这些申请者大多数是研究原子和量子物理学的。尽管该委员会声称资金是用于帮助技术和实验物理学的，但委员会的成员（包括作为主席的普朗克）常常把它们用于原子物理学。“确实，这笔钱是‘特别给实验研究的’，”普朗克1923年致信给索末菲尔德说，“但你的项目可以作为实验研究需要而提出来，主要的原因当然是你的名义。”（Heilbron 1986, 92）跟别处一样，在物理学

中，有名声，有朋友，就好办事。无疑量子物理学的问世并非官方组织的资助。然而，海森伯和玻恩都是受到非官方组织的支持的。当1926年量子力学证明——不只在一种意义上——具有其价值时，电器物理学委员会为自己而庆贺，是可以理解的。非官方组织的钱与支持已经慷慨地得到回报：“众所周知，量子力学是所有国家物理学界的注意中心，海森伯和玻恩的工作得到了电器物理学委员会的支持，没有这项支持，这工作或许不在德国而在别的地方。这证明电器物理学委员会在德国物理学的发展中是有贡献的。”（Cassidy 1992, 160）

1921~1925年间，非官方组织支持的物理科学项目，每年奖学金约10万金马克，这是一笔巨大的数字；此外，它还赞助了少量的研究人员。这组织对于物理学的重要性反映在研究出版物上。估计刊登在1927~1938年间的三个主要物理期刊上的8800篇论文的1/4是基于全部或部分由非官方组织资助的研究项目。据一个较小的统计记录，考虑海森伯的情况，1923年他是一个21岁有希望的物理系学生，也是非官方组织要培养的对象。他在1923~1925年间得到了非官方组织的资助，但生活费不够。他的哥廷根教授马克思·玻恩补足了他的生活费。跟其他物理学家一样，玻恩与德国工业家和外国慈善家交往密切。其中有的人赞助他的学院。玻恩曾接受金融家亨利·哥尔德曼的慷慨赞助，他用这笔钱帮助他的学生和助手，其中就有海森伯。那些帮助度过艰难的岁月的种种筹集资金的办法，有的是有规则可循的，有的则不是。

帝国物理技术研究所是在战争中存活下来的中心物理学组织之一。但它没有维持过去那种作为一个领导世界纯物理学研究机构的辉煌与地位。相反，当帝国研究所变得越来越定向于检测与技术时，它是在科学上退化了。在弗里德利希·帕森1924年任帝国研究所主任时，他向索末菲尔德抱怨：“纯科学在这里终止



了，”他接着说，“研究所已经变得越来越技术性了。纯科学研究在撤退。科学官员的态度就是很技术的。在他们大多数人身上，一点也看不到现代物理学的影子。”（Kragh 1985, 110）

国际关系

在 1884 年哥本哈根的一次医学大会上，路易斯·帕斯特确认科学的中立性和国际性。“科学没有本土国度，”他说。但他又接着说：“即使科学不具有任何本土国度，科学家应该特别报答自己国家。你总会发现每一个伟大的科学家都是一个伟大的爱国者。”（Kragh 1980a, 293）在第一次世界大战期间与之后，当证明爱国主义是这两种意识形态中较强势的一个时（参阅第九章），爱国主义与科学国际主义之间的矛盾心理就充分地展示出来了。在 1917 年一封致乔治·赫尔的信中，美国物理学家与发明家迈克·普平写道：“科学是文明的最高表现。因此，同盟国的科学是根本不同于日耳曼的科学的。……我们今天比过去任何时候都更清楚地认识到，科学不可能跟人的各种情绪和情感分开来……我认为从事科学的人首先是人，然后才是科学人。”（Forman 1973, 158）

在战争的最后时期，法国、英国和美国科学家讨论新的国际科学组织的结构，以取代国际科学院。在这些谈判中的领导人物是：美国天文学家乔治·赫尔、英国（德国出生）物理学家阿瑟·萨斯特和法国的数学家查里斯·埃米尔·皮卡。结果是 1919 年组成了国际研究协会（IRC），成员开始时限于同盟国政权以及那些与之结盟的国家，或反对德国的国家。成员国是：法国、英国、美国、比利时、意大利、澳大利亚、南非、日本、巴西、希腊、波兰、葡萄牙、罗马尼亚和塞尔维亚——显然这是一种政治选择，不是以科学卓越为基础的。在 IRC 名下各科学联合会的成员，如拟议中的纯物理与应用物理委员会（IUPAP），同样限于

这些国家。IUPAP 于 1922 年由来自 13 个国家的代表创建。威廉·H·布拉格任第一届主席，第二任主席是密立根。在困难的战争期间是瑞典的曼尼·西格本。1931 年以前，IUPAP 不甚活跃，因为这涉及组织从 IRC 过渡到 ICSU（国际科学联合会协会）。当时，IUPAP 是协会中八个科学联合会当中的一个。其他的是：天文学、大地测量学与地球物理学、化学、数学、无线电科学、生物学和地理学。

由于来自恐怖战争的仇恨与猜疑，德国、奥地利、匈牙利和保加利亚被排除在 IRC 之外，甚至连中立国也不允许加入。主张强硬路线者担心中立国可能改变 IRC 的权利平衡，担心他们同意原先的轴心国的进入。只是到了 1922 年，才允许某些中立国加入，它们是：荷兰和斯堪的纳维亚国家。法国的疑心似乎是有道理的，因为是这些国家首先为轴心国的准入辩护。1925 年洛伦兹根据荷兰、挪威和丹麦代表的提议建议取消排斥政策。虽然这动议得到英国和美国的支持，并在全体会议上获得 16 票中的 10 票。（当时 IRC 有 29 个成员国，只有 16 个到会，所以，即使动议获全票通过，也不足以改变局面。）第二年风向变了，因为洛伽诺条约保证了欧洲有个较为温和的政治氛围。当时，IRC 的科学家领导层，包括舒斯特、赫尔和皮卡（任主席）同意接纳德国，并且，向德国和其他原先的敌对国发出了邀请函。可是，当邀请函最后来到时，遭到德国和奥地利科学家的拒绝。结果是这两个国家仍然留在国际科学的正式机构之外，直到第二次世界大战之后。匈牙利是 1927 年、保加利亚是 1934 年加入的。

在 IRC 中排除德国只是战争的胜利一方的一种手段，试图孤立和削弱德国的科学重要性。从 1919 ~ 1928 年，德国科学遭到一种国际的联合抵制，即德国科学家不允许出席许多国际会议。在早期年月，这种联合抵制相当奏效，大多数国际会议排斥了德国人；1919 ~ 1925 年间，275 次国际会议中，165 次没有德国人参

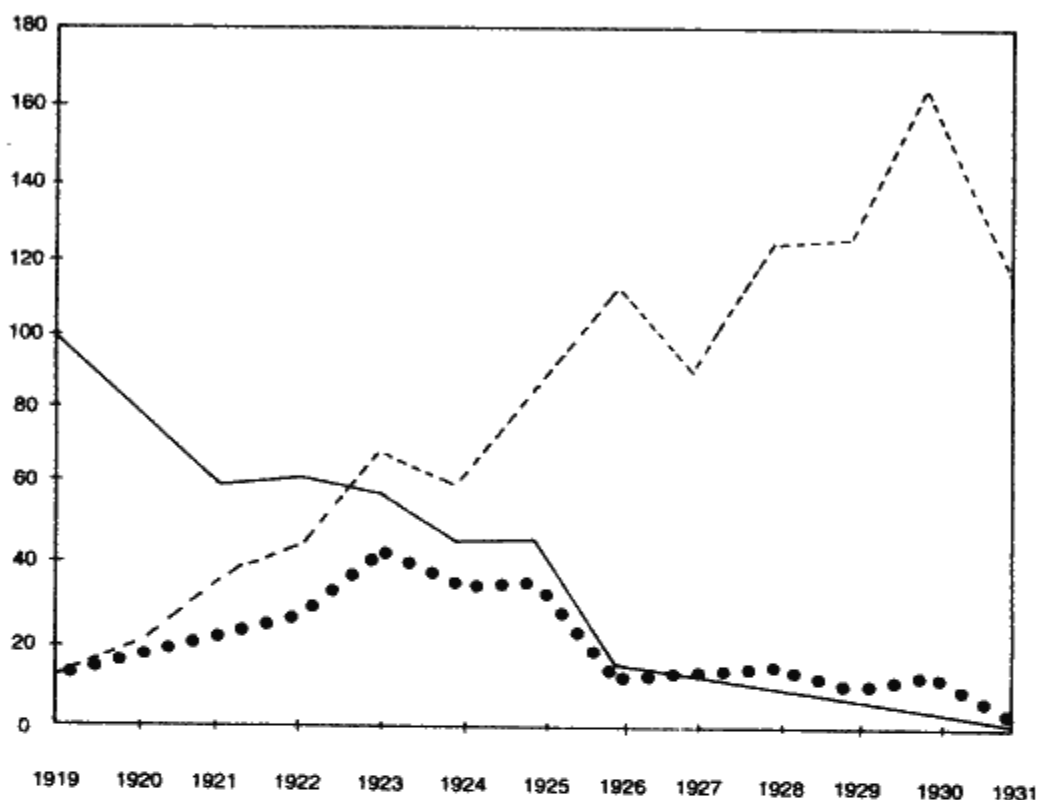


图 10.1 国际科学大会的次数（虚线），德国被排除在外的国际科学大会的次数（点线），实线给出德国在被排斥的大会所占百分比。来源：Schröder-Gudehus 1966

加（见图 10.1）。许多国际研究所、司局、代办处纷纷从德国土地上搬迁。1914 年有 60 个这样的国际性机构，其中 14 个在德国，18 个在法国；1923 年这种机构的总数为 85，其中 37 个在法国，只有 6 个在德国了。这些国际组织觉得不仅德国科学应该联合抵制，而且，德国语言和科学出版物也要联合抵制。在最高级别的国际大会上，德语不允许作正式语言。总之，如《科学》1920 年所说：“德语无疑是一种野蛮语，只是从原始野蛮人舞台上发出来的，而且……从 1914 年 8 月 1 日起，这样地对待它，应算是科学的进步。”

正如意料中的那样，联合抵制对德国科学的确带来诸多不便，虽然心理上的伤害多于实质的伤害。或许对联合抵制国家的伤害更大，他们必须在德国人缺席的会议上致力于唯德国专家领先的事业。1921年和1923年的索尔维大会的主题分别是“原子与电子”和“金属的导电”，由于没有德国物理学家参加，这些会议索然无味。联合抵制绝不是全体的，荷兰和斯堪的纳维亚国家并没有追随。1919年瑞典科学院决定授予物理诺贝尔奖给普朗克与斯塔克，化学奖给弗里兹·哈伯。给三个德国人授奖引起广泛的非议。给哈伯授奖尤其有争议，因为他卷入了德国的毒气战。在法国看来，在恢复德国科学声誉的努力中，瑞典做出了一个政治决策。哈伯似乎同意普朗克和许多德国科学家的关于科学分享强国的观点，他把这个奖看作是“来自瑞典专业同行们对于德国科学成就的一项贡品”，他致瑞典科学院的信就是这样说的。（Widmalm 1995, 351）

爱因斯坦是少数几个在国际上受欢迎的德国科学家之一。不仅因为他是一位世界最著名的科学家，而且因为他也是一位和平主义者和民主主义者，还有，他不被认为是一名“真正的”德国人（当时爱因斯坦持双重国籍：瑞士与德国）。但在20年代早期，即使是一名和平主义的瑞士-德国犹太人也可能有麻烦。当1922年春爱因斯坦接到保尔·朗之万的邀请去巴黎讲学时，他是被秘密地带到法国首都的，以免抛头露面引起麻烦。而且，他必须取消一个在庄严的科学学院的讲座，因为一旦爱因斯坦进入大厅，就有30名院士计划退场。对于他们来说，他是一个讨厌的德国人就足够了。

政治上利用爱因斯坦来反对他的德国同事的企图，不会比德国人为其政治目的利用爱因斯坦的企图成功多少。例如，1923年索尔维大会的组织者想要爱因斯坦出席，但遭到爱因斯坦的拒绝，因为他意识到其他德国科学家不会被邀请。如他致洛伦兹的



信所说：“[索末菲尔德]说我的出席索尔维大会是不对的，因为我的德国同事被排除在外。我的意见是不应该把政治带到科学事务中来。个人不应承担他们所属国家政府的责任。如果我出席大会，我就隐含地成为一个行动的帮凶，我会强烈地感到那是可耻的不义之举。”（Mehra 1975, X xiii）在同一时期英国流行期刊《浮华世家》的一篇题为《关于相对性的一切》的文章没心没肺地说：“反正，爱因斯坦是一个德国人，而整个事态无疑是一个德国人谋求重新获得对于苯胺染料贸易的控制。……他提出另一个问题来回答前一个问题。如果大会不是一个德国人既来又往的地方，也许这个发现本可以是一个友好的同盟国的代表发现的（要求附带读出：5个同盟国的名字，它们在同一时候是友好的）。”（Hentschel 1990, 125）《浮华世家》的评论是讽刺的，但是，讽刺锁定了当时科学的政治氛围中的一个实际问题。

另一个例子以不同方式说明了同一局面。1923年1月在哥本哈根的尼尔斯·玻尔研究所工作的匈牙利人乔治·赫维西和荷兰人德克·科斯特宣布发现了第72号元素——他们称之为元素铪（hafnium, Hf）。这引起了跟法国科学家的优先权之争。法国人宣称已经发现了该元素——他们将铪称之为“celtium”（Ct）。争端开始于1923年，初当时德、法关系因德国-比利时占据鲁尔区而紧张到快要破裂的边缘。发现权之争带给紧张的德法关系一种特别的气息。铪的发现以及因此对法国造成的不信任，被军事同盟国的科学家视为一种反对法国声誉的阴谋，企图给德国提供一个智力复仇的机会以挽回其军事上的失败。当赫维西在卢瑟福的规劝下把一篇关于铪的论文提交给亲法和亲Ct的《化学新闻》时，其编辑W·P·威纳的反应是：“我们坚持原先由乌尔本起的名字Ct，因为他是一位伟大法国的代表，在整个战争中是忠于我们的人。我们不接受丹麦人起的名字，他们只是战后才吞噬战利品。”（Kragh 1980a, 294）虽然没有德国人对发现做出贡献，然而，它

是跟“日耳曼科学”相联系的。赫维西是匈牙利人，因此是前敌人；科斯特是荷兰人，在瑞典和丹麦度过了大部分科学生涯，这两个国家都被指控是亲德国的。虽然尼尔斯·玻尔在科学中的地位阻止任何对他行动的直接批评，但联合抵制战线的许多激进者仍觉得他对德国太软弱。在战争期间与战后玻尔跟他的德国同事保持正常的和友好的关系，玻尔曾到德国讲学，参加许多非官方会议，款待德国物理学家的来访。他总是细心欣赏他的德国同事们的成果；他在德国期刊上发表他的许多重要论文，因此不理睬那种孤立德语的企图，它们视德语是不值得进行科学对话的语种。所有这一切，使得玻尔与哥本哈根物理学看来在许多方面是亲德的，从而增加了日耳曼主义跟铀有关的暧昧感。国际化学元素委员会对这件事特别敏感。它是 IRC 的一个分会，没有中立国的代表。Ci 没有科学可信性，但该委员会出于政治考量不核准铀 (Hf)。只在 1930 年铀才被正式认可。

德国不是科学因战争而遭折磨的唯一国家。年轻的前苏维埃政权的物质条件甚至更为恶劣，它被其他国家的孤立比德国严重得多。因为不分科学家与非科学家，营养不良、斑疹伤寒和内战带来同样的苦难和死亡。在 1918 ~ 1922 年间的恐怖时期，物质上的艰难条件使得物理学家很难恢复其研究活动和建立研究机构。俄罗斯物理学家联合会，主要通过奥瑞斯特·克沃尔逊和阿布拉姆·伊奥菲的努力，创建于 1919 年。但该组织对于标准化的任务证明是不适合的。有一段时期，科学出版物被纸张的缺乏所阻碍或大大耽搁。例如，俄罗斯的第一本关于广义相对论的书，由亚历山大·弗里德曼和福斯维罗德·弗瑞德里克斯完成，由于缺纸 1924 年才出版。俄罗斯物理学家力图重建他们的学科，打破西方国家的封锁，只在 1922 年才获得部分的成功。那年，刚组建的苏联跟德国建立了外交关系，因此德国与俄罗斯的物理学家之间的接触增加。伊奥菲，列宁格勒物理技术研究所的奠基人，



去柏林购买最需要的科学著作、期刊增补和仪器。他与其他的俄罗斯物理学家受到他们的德国同行极富同情心的接待。尽管他们政治上分歧，他们多么想建立起两个草根国家之间的专业联系呀。1922 年德国物理学会选举列宁格勒物理学家克沃尔逊为他们唯一的一位荣誉会员。约从 1925 年起，跟西方的联系进一步增加，许多前苏联物理学家访问德国和别的西方国家，包括美国。前苏联物理学家渴望在西方期刊上发表论文。他们选定《物理杂志》为最喜欢的期刊。在 20 年代后期，《物理杂志》中 12% 以上的论文是俄罗斯人写的。在 1920 ~ 1936 年间，他们撰写了 592 篇论文，其中 1/3 的论文的作者为列宁格勒物理技术所的物理学家。那是前苏联最重要的一个物理研究所。

物理学共同体

如前所指出的，在 20 世纪 20 年代早期，德国物理学共同体在科学、政治和意识形态等问题上分裂了。大的右翼群体包括斯塔克和勒纳德等法西斯主义者和较少意识形态的物理学家，如威廉·维恩和奥托·鲁梅。右翼物理学家主要具有相同的政治观点，包括沙文主义、极端保守主义和反对德国共和。反犹太主义也是他们所共同的。1922 年，当帕森提议阿尔弗雷德·兰德为保守派的根据地图宾根的联合教授席位时，他感到他的同事怀有负面的成见，不仅是因为兰德是一个“进步的”原子理论家，而且因为他是一个犹太人。（这样的事例以及通常的反犹太人倾向，不限于发生在德国；在美国和某些其他国家的许多大学里，歧视犹太人也是常见的。）虽然在德国有一个可识别的右翼，却没有一个同情社会主义的左翼。就其表达对于一切政治有兴趣而言，帕森、普朗克、劳厄、索末菲和大多数有建树的进步物理学家，一般持保守的反政府的观点。爱因斯坦和玻恩是其中的个别

例外。如果仅从右翼的极端标准来看，德国主流物理学家的资产阶级保守主义似乎是自由主义。没在战争中服务过的年轻一代，包括海森伯、约丹和泡利，主要是反政治的。

右翼物理学家的科学观点，在相当程度上平行于他们的保守的政治观点。他们忠诚于威廉时代科学的标准，反对共和时期的时代精神。大多数物理学家执着于经典的机械主义和电磁学世界观，包括诸如以太、决定论、因果性和客观性等观念。这些观念在 20 世纪 20 年代变得过时了。然而，他们并非完全跟共和的时代精神不协调。对于可视性的追求，以及以物理直觉替代抽象的数学推理，对于那些调整其观点以适应时代精神的保守者和“进步者”，是同样重要的。跟量子论与相对论直接分离的右翼以牺牲理论却强调实验的方式以维持自身与时代的合拍。并非所有的实验家都是保守者，也非一切理论家都是“进步者”。但是，仍然存在一种相关性。

就某种程度而言，“保守者”与“进步者”之区分，反映了有权势的柏林物理学家与地方大学物理研究所之间的关系紧张。然而，区分不是分明的，如慕尼黑和哥廷根的强大理论学派所说明的。一句“具有非柏林（哥廷根）渊源”的口头禅根本不适合量子力学，并且，在那里大多数柏林物理学家喜欢薛定谔的保守版本更胜于海森伯的激进版本。然而，对于许多物理学家来说，不管公平不公平，“柏林”一词就是表征抽象理论、犹太人的唯理智论、自负和粗俗。德国物理学会由柏林物理学家主宰，他们因此对学会持怀疑态度。1916 ~ 1918 年间，爱因斯坦任学会主席。在马克思·维恩——这个来自吉纳大学的实验家——的地位下降后，由索末菲尔德继任主席。1920 年斯塔克组织了一个对抗组织**德国学院物理学家联合会**，但是，新的联合会的重要性有限；由于慕尼黑物理学家维恩是新任的物理学会主席，所以，关于“柏林派”的指控变得没有多少信服力了。



区分德国物理学家的另一个问题涉及物理学应用与工程的需要。这些应用跟共和的反功利主义的时代精神不协调，而且，大多数主流物理学家的确很少关注技术物理学。但是，许多右翼物理学家渴望将其物理学应用于技术之中。在战争期间，德国大比例的物理学家从事工业或技术工作。他们觉得其工作没有得到物理学会的足够尊重。当1919年德国技术物理学会创立时，其部分原因是对于“柏林派”的物理学会可觉察的理论主宰的一种反动。一年内，新学会的会员猛增到500人，而在1925~1935年间，它吹牛有跟物理学会一样多的会员，约1300人（见图10.2）。格尔克——反相对论者——是技术物理学的奠基人之一，经常在他的期刊《技术物理杂志》上发表论文。

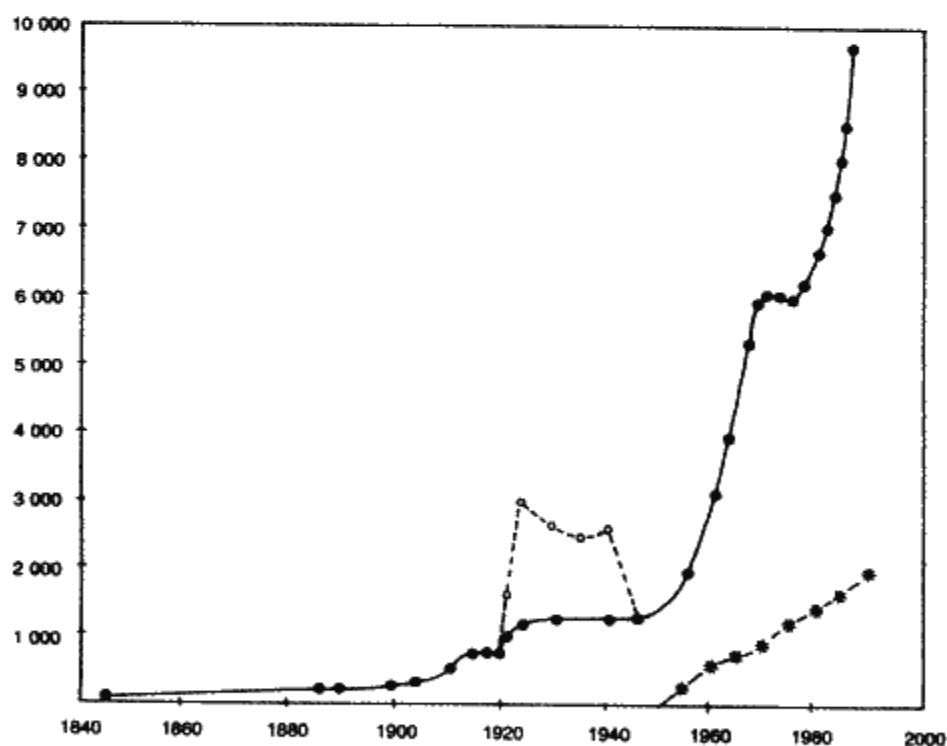


图 10.2 德国物理学会会员数，从 1845 年创办到 1986 年。来源：Mayer-Kuckuk 1995

在有名望的学术期刊中,《物理学纪事》是右翼物理学家所喜爱的,如果他们不能在《物理学纪事》上发表文章,他们宁可在名声不如《物理杂志》,或者,甚至在没有名声的期刊上发表。1920年由物理学会创办的《物理杂志》,带有自由的与先锋的观点,是年轻一代量子物理学家的宠物,但几乎受到“反对派”的联合抵制,对他们来说,它表征着现代物理学的堕落与教条。

薛定谔的连载论文在《物理学纪事》上而不在《物理杂志》上发表,几乎不是一种巧合。当《物理杂志》在1920年发行时,计划每年出三卷,最大篇幅为1440页。但它的成功使它的扩展大大超出最乐观的期待。1924年出了十卷,共4015页,而1929年出了七大厚卷,共6094页。期刊的语言是德语,它的成功是德语作为国际物理学的语种的重要性的明证。当一篇由印度物理学家R·N·嘎什用英文写的论文在《物理杂志》上发表时,引起了许多德国物理学家的激烈抗议。期刊主编,有能力的卡尔·席尔被迫承诺一切论文必须使用德语。对于勒纳德来说,这一承诺来得太晚了,他厌恶英国的一切。他抗议地离开了学会,他在他的海德堡物理研究所前树了一个标牌:“所谓的德国物理学会的会员禁止入内。”(Beyerchen 1977, 98)

时代精神与物理世界观

在1918年接下来的10年里,德国物理学不仅面对经济困难,还要面对一个变化了的、敌视物理学传统价值的知识环境。物理学,以及一般的科学,现在越来越被指控是没有灵魂的、机械论的和违背人的价值的。这种指控在德国和别处是老调子,但在德国共和中,它变得更频繁了和更有权威了。反科学或非科学的态度在哲学、心理学和社会学中是流行的,而且,占星学、神秘教义和神秘主义的其他分支茂盛起来。1927年索末菲尔德写道:



“对理性世界秩序的信念不幸被战争终止，面对和平的弱势而动摇了；因此，人们在一种非理性世界秩序中寻找救助。……因此，我们又一次显然地遭遇到非理性与罗曼蒂克的波涛，就像一百年前扫荡过欧洲的波涛，它是对于 18 世纪的理性主义及其一点也不使宇宙谜底更易于解决的趋势的一种反动。”（Forman 1971, 13）许多物理学家觉得：这一时期的精神基本上与他们的科学信念是对抗的，而且，用于教育公众的科学思想是外来工作者的观念。作家与哲学家强调生活哲学与纯哲学，而不是科学的结论，他们用一种过时的唯物主义和关于因果性与客观性的不确定的信念来取代科学的信念。不是数学分析、控制实验和因果说明，而是整体性、直觉、相对主义和存在主义提到了议事日程。

新世纪纲领最有影响的陈述是由奥斯瓦尔德·斯彭勒在他的晦涩而大众化的《西方的沉落》中表述的。该书在 1918 ~ 1926 年间印刷了 10 万册。按照斯彭勒对上下文明的扫描分析，现代科学处于深刻的危机之中，不仅仅是因为它没有设法适应于新文化，摒弃诸如因果性与客观性等旧的时髦观念。斯彭勒主张科学是人类学的某一特定时期特定文化的一种表现；物理学是相对于文化与历史的，不存在离开或独立于局域文化环境的物理学——读者可能感到这跟该世纪最后几十年的公众观点有一种联系。斯彭勒，他对于现代物理学的洞见没有达到令人满意的程度（但他的读者很少知道），他相信统一思想与精神的新物理学的时机已经成熟。可是，新物理学不可能建立在旧的基础上，它需要一种新的文明：“由自然科学编织的、巨大而从来无意义的陈旧网破碎了，毕竟它是心灵的内部结构。……但今天，在科学纪元的日出胜利之时，猜疑的乌云化解，早晨的安静风景以各种特色重新出现。……经历奋斗而破败，西方科学回到了其精神家园之中。”（Forman 1971, 37）斯彭勒的哲学或许是混乱的和辩护不当的，但它代表着时代精神，高度地影响着当时的文化讨论。它为实际

有教养的一切德国人所知晓，包括物理学家。

如果这种反理性主义的和反实证主义的氛围主宰着大部分德国共和的文化，假如它对于传统科学的合法性本身提出了质疑，那么，物理学家对新观念做出回应就是一件自然的事。他们不是去捍卫科学传统的价值，而是在许多情形中向新的科学精神屈服。这种适应的一个结果是：物理学家从其实用性而不是从强调物理学是实质的文化来获得科学的合法性。在不知不觉地把自己的价值观同化于他们认为的新时代精神，有的物理学家向新的、斯彭勒的观点“投降”了。例如，在20年代早期，几个德国物理学家说到物理学的危机，主张因果原理不再被视为物理学的基础了。这种对因果性的放弃不是基于物理学特定实验或理论的发展。

1925年出现的量子力学是一个德国的理论，它破坏了微观因果性。因此，自然要问：在1925年以前关于反因果性的一般观点与新量子力学的形成与解释之间是否有一种因果联系。历史学家保尔·福曼证明：德国物理学家由于受共和时代精神的影响，倾向于一种反因果的量子论，并认为现有的半力学的原子论存在危机。按照福曼的看法，旧量子论的危机本身可能就依赖于共和的智力传媒。可是，有良好的理由去驳斥，那种认为在年轻的德国共和的社会意识形态环境与引入反因果的量子力学之间，有一种强联系的观点。这里提及几个理由就足够了：

1. 虽然物理学家在面对一般听众所作的报告和所写的文章中常常讨论（反）因果性问题和与其他相关时代精神的问题。这些论题在科学论文或在对科学听众的讲话中几乎从未提及。
2. 就物理学家适应时代精神而言，适应仅涉及科学的价值，不涉及其内容。
3. 许多物理学家有好的理由否定精细的因果性，并不需



要“被变换”。无论如何，德国物理学家中只有很少一部分人似乎在 1925 ~ 1926 年以前主张因果性。

4. 索末菲尔德、爱因斯坦、玻恩、普朗克和其他的物理学家领导层不向时代精神屈服，而且，公开批评它。
5. 承认原子物理学中存在一些危机是 1924 年前后广泛流传的，主要是由于已有的理论说明不了反常。玻尔和少数几个物理学家模糊地提出过能量守恒与时空描述可能必须摒弃（见十一章）。
6. 原子物理学中第一个反因果理论，1924 年玻尔-克拉末斯-斯拉特散射理论，在德国不是普遍被接受的，相悖于人们按时代精神论题所期盼的。而且，那些接受该理论的人看重的是它给予的科学承诺，而不是它的意识形态。反因果性的理论因素不被视为它的最有趣特色。此外，理论源于哥本哈根，那里具有一种不同于德国共和的文化氛围。这三个人，一个丹麦人，一个荷兰人，一个美国人。
7. 反因果量子力学的先锋是玻尔、泡利和狄拉克，他们都没有受德国时代精神的影响，创造量子力学的德国物理学家更多是对其科学生涯而不是对文化趋势有兴趣。他们只悉心研究，一点也不关注社会上所发生的一切。

总之，有很好的理由——内在的和外在的——说明为何量子力学起源于德国。就我们所能判断的，适应于德国时代精神不具有特别的重要性。

第十一章 | 量子跃迁

量子反常

玻尔清楚地意识到的，他 1913 年的原子量子论只不过是一种新研究纲领的开始，它会把他与他的同事带进一个陌生的领域；它根本不是一个完成的理论。在战争年岁里，这理论主要被玻尔及一群德国物理学家，也被——尽管有战争的分离——英国的、荷兰的和日本的同事们所扩展和修正。最重要的早期推广是慕尼黑的索末菲尔德所做的工作，他的工作迅速地使他成为原子物理学的权威，并获得一种仅次于玻尔的地位。索末菲尔德关于原子理论的强有力的并具综合性的教程《原子构造与光谱线》，以在慕尼黑大学 1916 ~ 1917 年开出的课程为基础，1919 年第一次出版发行。在随后的几年里，该教程历经几个新版本，成为战后一代物理学家关于原子理论学的一部“圣经”。1923 年第三个德语版本翻译成英语。

索末菲尔德精通纯数学，是将高等数学方法运用于物理问题的专家，他发展了玻尔的简单理论，将其置于一个扩展利用作用量积分的基础之上。索末菲尔德的具有几个自由度的原子系统的动力学描述，是以形如 $\int p_i dq_i = n_i h$ 的量子条件为基础的，这里，



q 和 p 分别是广义坐标与广义动量, n 是整数量子数。索末菲尔德 1916 年的原子用两个自由度表征, 主量子数 n 与轴量子数 k , 不久就扩展到磁量子数 m 。利用这一技术, 索末菲尔德得以再现氢原子能级的玻尔公式, 并把它扩展到相对论的精细结构。这是旧量子理论的一个大成功。慕尼黑程式也包括了利用天文力学所熟悉的作用角变量方法, 但在那以前很少在物理学中使用。利用这些方法, 1916 年俄罗斯物理学家保尔·埃普斯坦 (当时作为敌对国人员被扣留在慕尼黑) 和天文学家卡尔·史瓦西独立地给出斯塔克效应的详细计算, 跟实验一致。谱线在强电场中的分裂是约翰尼斯·斯塔克 1913 年发现的。它与经典说明相悖, 但基于玻尔理论可以理解其一般特征。关于斯塔克效应的最早工作, 包括玻尔于 1914 年提出的一个理论, 只产生定性的一致。埃普斯坦 1919 年得出结论: 他的新结果“证明玻尔原子模型的正确性, 其论据之如此令人瞩目甚至连我们的保守同事也否定不了它的说服力”。(Jammer 1966, 108) 同年, 索末菲尔德和彼特·德拜也独立地说明了简单的塞曼谱线三分裂现象。

玻尔在原子论中所喜欢的方法不是索末菲尔德的作用量积分, 而是他在 1913 年松散地用过的对应性原理。这原理成为量子理论的玻尔早期学派的实质证明, 是构建新的量子力学的重要概念引导。1920 年左右如玻尔所理解的, 对应性原理的实质如下: 在大量子数的范围内 ($n \rightarrow n - m$, $m \ll n$), 从差别不大的初态向定态的跃迁导致几乎跟经典麦克斯韦电动力学的预期一样的频率。这只是来自玻尔关于原子的量子论, 而不是其广泛意义的对应性原理的内容。

玻尔意识到原始的量子论是不完全的, 因为它尽管指定了频率, 它对强度与频率的关系却未说一个字。这是一个严重的缺陷, 因为要把一个理论导出的光谱跟一个实验测得的光谱作比较, 各谱线的强度是必须知道的。因此, 玻尔把对应性原理扩展

成为涵盖经典强度的一种对应性，这就是，二级矩阵傅立叶系数的平方（经典的强度测度）跟爱因斯坦在他的 1916 ~ 1917 年辐射理论中引入的跃迁几率系数之间的一种对应性。玻尔写道：“我们可以期待：对于 τ 的小值，对应于给定 τ 值的谐振动将以相同方式给出两个态 n' 与 n'' 之间跃迁的几率的一种测度，这里， $n' - n'' = \tau$ 。”（Darrigol 1992, 126）

作为对应性原理的一个重要推论，如果一个具体的谐振分量是 0，那么，跃迁的几率必定也为 0。这样，玻尔与他的助手应用对应性原理来估计谱线强度，并推导出选择定则。例如，虽然波兰物理学家阿达尔贝特·卢宾诺维兹，索末菲尔德的一名助手，推导了轴量子数的选择定则 $\Delta k = 0, \pm 1$ ，玻尔从他的对应性原理推得跃迁 $\Delta k = 0$ 不可能发生。分光镜证据说明玻尔的结果是正确的。对应性原理第一个和最深刻的运用是由亨德里克·A·克拉默斯做出的，这个年轻的荷兰人在哥本哈根玻尔手下工作。在他的 1919 年的学位论文中，克拉默斯详细计算了氢谱线的强度与极化，包括塞曼与斯塔克效应。他的结果是出色的，虽跟资料一致性上不理想。

对应性原理是玻尔的独到发明。它在德国被怀疑地接受，那里，索末菲尔德更为形式的量子原理与演绎程式被认为是更有希望的。在索末菲尔德看来，对应性原理太具有“魔杖”特征了，在他的《构造》第一版中就是这么称谓的。1935 年克拉默斯回忆起许多物理学家对于玻尔半经典地使用这一原理是如何感受的：“开始时，对于物理学家来说，对应性原理似乎像是一根魔杖，在哥廷根之外不起作用。”（Kragh 1979, 156）在他 1921 ~ 1923 年的“第二原子理论”利用其对应性原理中，玻尔魔法是很强的、也特别暧昧。他试图综合运用 X 射线分光镜学、化学资料、对应性论据，以及模糊的对称性原理电学地构造 2 - 量子 (n, k) 的原子模型，从氢元素到铀元素。他甚至推出了原子序数为 118



的超理论元素的电子位形，他预言那将属于惰性气体类。跟他1913年的图景不一样，现在的电子模型是沿椭圆轨道运动的，并且，在其轨道运动中，电子深入到内电子区，从而产生旋转电子之间的耦合。在1922年哥廷根一次会议上，玻尔详细地介绍了他的理论。他的风格和思维方法——或许比他的理论本身更深深地影响着与会者，其中大多数是德国原子物理学的精英。几个年轻物理学家离开第一次会议时就掌握了魔法，深信对应性原理的巨大价值。

虽然玻尔关于周期系的理论不久被更好的理论所超越，它却是第一次对一切化学元素的原子结构给出一个合理的、满意的说明。特别地，玻尔主张：稀土元素的电子特征为 $n=4$ 级中逐渐构造起来的，从镧的 3×6 个电子到镥的 4×8 个电子，这意味着原子序数为72的未知元素的化学性质会相关于镭，不是一种稀土元素。1922年末，当元素72（铪）在锆矿中发现时，玻尔的预言得到了证实。虽然，这预言并非明确地来自玻尔理论，这次发现一般被视为他的具体理论的光辉确认，也是对于原子的一般量子理论的确认。

索末菲尔德-玻尔理论的每一次成功推进，都伴随有失败或反例。虽然氢原子（以及其他的单电子原子）已被理论光辉地证明了。但简单的原子氦，要证明它却遇上麻烦。1918~1922年，哥本哈根的玻尔与克拉默斯、哈佛的埃德文·肯布尔与约翰·范弗列克和法兰克福的阿尔弗雷德·兰德，以及柏林的詹姆士·弗朗克与弗里兹利用量子理论的可行工具考察了氦光谱。他们的方法与进路互不相同，但整体的结果普遍地令人失望：虽然量子理论的预言不完全跟测量相悖，但分歧的喧嚣足以使大多数专家同意范弗列克1922年的结论：“原子结构的常规量子理论的某种根本性修正似乎势在必行。”（Kragh 1979, 132）1932年当玻尔和海森伯详细而系统地分析了氦原子，并推导出一个跟观察到的不相

同的谱线时，这甚至变得更加清楚了。多电子原子中的反常塞曼效应是一场灾难。

在 1920 ~ 1924 年间，许多物理学家着手这个问题，包括兰德，他有能力对观察到的谱线分裂给出一个唯象论的说明。可是，不论是兰德、索末菲尔德、泡利、海森伯还是为这问题伤透脑筋的别的物理学家，都不能用量子理论的语言来证明他们的结果合理。“同反常塞曼效应打交道是个巨大的痛苦，” 1923 年 7 月 19 日泡利致信索末菲尔德这么说。他还补充说，这痛苦包括“[所有] 原子都不只含一个电子”。(Mehra and Rechenberg 1922: 1 502)

其实，痛苦不限于多电子原子。即令单电子系统也麻烦不断，这是那些只想相信氢原子理论是理想地定型了的物理学家，不甘愿接受的事实。1921 ~ 1923 年间，泡利以及荷兰的卡尔·尼森独立地考察了氢分子离子，计算的电离能并不跟稍后的实验一致。另一个反常是 1922 年被慕尼黑大学的奥托·欧登伯格发现的，氢谱线展示出弱磁场（与较强场中正常的塞曼效应相反）中一种反塞曼效应。按照玻尔-索末菲尔德理论这个所谓的帕森-巴克效应——按 1912 年的发现人弗里德利希·帕森和恩斯特·巴克命名——不应当在氢中出现。1924 年，人们认识到：量子理论不能说明在电场和磁场正交情形中运动的电子。同样，例如，两个氢原子之间的共价键仍未被说明——一般地，物理学家的量子理论很少与化学家联姻。1924 年末，罗伯特·马利肯根据他对分子光谱的研究得出结论：谐振子的最低能态不是 0，而是 $\frac{1}{2}h\nu$ 。零点能的存在跟夭折的普朗克理论一致，但跟后来的理论不一致。问题是：按照玻尔-索末菲尔德理论，不应该存在零点能，跟马利肯的发现相悖。最后，在 1923 ~ 1924 年间实验业已确立：慢电子不顾原子间的强力场自由地穿过氦气。这个所谓的雷姆绍



尔效应被认为是一种新的量子效应，暂时不能给予更令人满意的解释。发现这效应的是黑德尔堡格物理学家卡尔·雷姆绍尔与其他人。因此，存在许多相关的实验与事实，是玻尔-索末菲理论所不能说明的。就这意义而言，它们是反常的。可是，它们中大多数不能被视为很严重的问题，在1924年前后的量子危机中不起重要作用。例如，大多数物理学家不理睬理论说明不了共价性，甚至连氢分子离子的反常也不被视为一个跟氦分子以及反常塞曼效应一样严重的问题。

到1924年，实验反常的积累以及对于现有量子理论的概念与逻辑结构的广泛不满，在原子物理学家的一个小团体中引发了一个危机的境况。几个物理学家得出结论：玻尔-索末菲的量子理论存在无法修补的错误，必须被某种别的理论所取代。但是，由于它的许多成功，“旧”理论几乎不可能完全错了，一般期待它以某种对应性的方式相关于新的量子理论。1923年马克思·玻恩相信“整个物理学的概念体系必须从基地做起”。(Forman 1968, 159)也是玻恩，在1924年一篇论文中敲定“量子力学”这个词汇，在这篇论文中，他讨论了以相对性原理为手段从经典公式向它们的量子理论对应物的可疑过渡。玻尔-索末菲理论的不合适性得到承认，并且，有一个名字——量子力学——作为它的后续者。不幸，无人知道未来的量子力学是什么。

早期量子理论特别在三个研究中心孕育着。在慕尼黑，索末菲建立起了他的学派，在其合作者中有埃普斯坦、卢宾诺维兹、格雷戈·温泽尔和威廉·楞茨等科学家。玻恩只是在1921年成为哥廷根的教授才相对晚地转向原子理论的。他的助手是泡利、弗里德里奇·洪德和帕舒尔·约丹，他把哥廷根变为量子理论的一个世界中心。两个德国中心之间有着密切的联系，索末菲的两个研究生泡利和海森伯从慕尼黑来到哥廷根就是明证。

不过，哥本哈根的玻尔是原子理论早期阶段的主宰力量是毋庸置疑的。新的理论物理学大学研究所“玻尔研究所”，于1921年创立。它吸引了世界上所有地方的来访者。在出现量子力学之前和之后，玻尔研究所被公认是原子理论的麦加（表11.1）。

表 11.1 1916 ~ 1930 年间，来玻尔研究所访问的外国物理学家

姓 名	时 间	年龄	国家
H·卡什米尔	1929, 1930	20	荷兰
C·达尔文	1927	40	英国
D·丹尼逊	1924 ~ 1926, 1927	24	美国
P·狄拉克	1926 ~ 1927	24	英国
R·福勒	1925	36	英国
J·弗朗克	1921	39	德国
E·佛斯	1927	34	德国
G·伽莫夫	1928 ~ 1929, 1930	24	前苏联
S·哥德斯米特	1926 ~ 1927	24	荷兰
D·哈特里	1928	31	英国
W·海森伯	1924 ~ 1925, 1926 ~ 1927	22	德国
W·海特勒	1926	22	德国
G·黑费斯	1920 ~ 1926	35	匈牙利
E·惠克尔	1929	33	德国
F·罕德	1926 ~ 1927	30	德国
P·约丹	1927	25	德国
O·克莱因	1918 ~ 1922, 1926 ~ 1931	24	瑞典
H·克拉默斯	1916 ~ 1926	22	荷兰
L·朗道	1930	22	前苏联



续表

姓 名	时 间	年龄	国家
A·兰德	1920	32	德国
N·莫特	1928	23	英国
Y·仁科方雄	1923 ~ 1928	33	日本
W·泡利	1922 ~ 1923	22	奥地利
L·泡林	1927	26	美国
S·罗斯朗德	1920 ~ 1924, 1926 ~ 1927	26	挪威
A·卢宾诺维兹	1920, 1922	31	波兰
J·斯拉特	1923 ~ 1924	23	美国
L·汤马斯	1925 ~ 1926	22	英国
G·乌伦贝克	1927	30	荷兰
H·乌瑞	1923 ~ 1924	30	美国
I·瓦勒	1925 ~ 1926, 1927, 1928	27	瑞典

注：这个表是不完全的。表中年龄指首次访问的年龄。所有访问者都在哥本哈根大学跟随玻尔，从 1921 年起在玻尔的理论物理研究所工作。在 1920 ~ 1930 年间，访问一个月以上的物理学家有 63 名，他们来自 17 个国家，最多的是美国（14），其次为德国（10）、日本（7）、英国（6）、荷兰（6）。资料来源：Robertson 1979。

海森伯的量子力学

跨越散射理论通往量子力学的道路，作为一种重要成分，涉及试图基于差分而不是微分方程构建量子理论的色散理论，这一工作是由哥廷根的玻尔和他的合作者以及他在哥本哈根的合作者所追求的。哥本哈根的克拉默斯深深卷入色散理论之中。1924 年

秋，克拉默斯与海森伯发表了关于色散的一个重要理论，回头看，它可视为迈向新量子力学的第一个决定性的步骤，辐射理论已经变得相当尖锐，特别当1923年阿瑟·康普顿发现单色X射线脉冲具有跟爱因斯坦的旧光量子假设一致的动量和能量（ $p = h\nu/c$ 和 $E = h\nu$ ，这里 ν 是频率）的粒子时。苏黎世的德拜独立地得到一个类似的结果。康普顿的重要发现在哥本哈根引起严正的关注。那里玻尔坚定地反对光量子或光子解释。作为替代，玻尔和克拉默斯把约翰·斯拉特的一个观念发展成为一个非光子辐射理论。1924年玻尔-克拉默斯-斯拉特理论是以“虚光子”概念为基础的，并假设能量只在原子与辐射之间相互作用中统计地守恒。玻尔和他的合作者不仅放弃了严格的能量守恒，而且，主张辐射过程不可能在时空中被因果地描述。虽然，有争议的玻尔-克拉默斯-斯拉特理论是短命的——当沃尔特·博特和汉斯·盖格1925年春证明它跟实验不一致时就被摒弃了——它却是有影响力的，并引导着海森伯进一步探索。玻尔接受了实验的否定，但没有接受光子。

1925年3月在哥本哈根的一次会议上，玻尔、克拉默斯、斯拉特、海森伯和泡利讨论了量子力学中增长着的危机。几个月之后，回到哥廷根，海森伯发现了表达一种抽象量子力学的方式，它有望成为基本的、逻辑一致的和不被玻尔-克拉默斯理论纠缠的量子力学。新理论中引导性概念主题，如海森伯在其1925年9月18日《物理杂志》的学术论文的摘要所写的，是寻求“理论量子力学的一个基础，它排外地建立在原则上可观察的量之间各种关系的基础上”。随后在文章中，他详细阐述了“摒弃一切观察那种迄今为止未被观察的量——诸如电子的位置和期间等——的企图，似乎是合情合理的。……试图建立一种类似于经典力学的理论量子力学以取代之，但在其中，只发生可观察量之间的关系，似乎更为合理。”实证主义的可观察性判据是这一理论的基础。



础，但不是一个特别新的或有争议的基础。量子理论应当建立在可观察量之上以及电子轨道因而要免除的思想，在当时已被广泛地，特别是被泡利和玻恩关注。

早在 1919 年，泡利批评外尔的引力与电磁学的统一理论中强调：只有那些可观察的量才能进入物理学理论。1925 年春，玻尔与约丹在量子力学范围内重复这一相同的思想，把它称为“具有重大意义和富有成果的一个基本原理”。可是，没有坦途从可观察性原理通向量子力学，这大道的根基则是海森伯在复杂地利用玻尔对应性原理与他本人同泡利的精深智力交流中发现的。

只是为了瞥见海森伯的推理，我们来假设一个原子的位置坐标 $x(n, t)$ ，这里 n 可以表示能量。电子可以进行频率为 $\omega(n)$ 的某种周期运动。虽然 $x(n, t)$ 不是一个可观察的量，它可写为一个傅立叶级数，其中每一项可以相关于可观察量，即， $x(n, t) = \sum a_\alpha(n) \exp[i\alpha\omega(n)t]$ ，和 $\sum$ 是对于整数值 α 取的。这个表达式是被双重指标 n 和 α 的集合表示的。海森伯提议，经典项 $a_\alpha(n) \exp[i\alpha\omega(n)t]$ 对应于量子项 $a(n, n - \alpha) \exp[i\omega(n, n - \alpha)t]$ 。新的量是依赖于两个量子态 n 与 $n - \alpha$ 之间的跃迁符号方阵或表格。海森伯发现两个这样的表格相乘并不满足对易律，即 xy 不等于 yx 。这是一个神秘的结果。开始时，海森伯视其重要不如嫌其麻烦。

海森伯对力学的解释是高度抽象和不易理解的，甚至连海森伯本人也不理解。这理论导致许多结果，尽管初看起来，它们给人的印象不深。开始时，海森伯寻求把他的理论应用于氢原子，只是发现即便这样一个简单情形也是太复杂而不能解决。因此，他转向不太现实却仍不平庸的非谐振子情形，并且，他得以满意地处理了这个问题。与此同时，他对玻尔的频率条件 ($E_n - E_m = h\nu_{nm}$) 和玻尔-索末菲尔德量子条件提供了一个证明。对于谐振子，

他发现能谱 $E = (n + \frac{1}{2})h\nu$ ，从而导出了近来受到分光镜学支持的零点能。在哥廷根，玻恩很快认识到海森伯理论的重要性，在一篇跟约丹合写的论文中考察并扩展了这个理论。玻恩认识到海森伯的符号非对易乘法可写成矩阵乘法的形式，且量子力学变量是一些矩阵。在此基础上，玻恩与约丹证明了动量与位置之间的基本对易关系是 $pq - qp = (h/2\pi i) I$ ，其中 I 是单位矩阵。有了矩阵是为量子力学设计的算法的洞识，事情的发展就迅速了。在1925年的著名“三人论文”中，海森伯理论被建立在一个坚实的基础上了。在不用或不知矩阵的情况下，剑桥大学23岁的狄拉克也发展了这个理论。1925年秋，狄拉克准备好了他自己的量子力学版本，他是建立在从两个量子量的海森伯乘积 $(xy - yx)$ 向经典力学熟知的泊松括号的过渡基础上的。狄拉克独立地得到了玻恩、海森伯和约丹的许多结果。他的量子力学版本成为所谓的 q -数代数。

不论是哪个版本，新量子力学从数学角度比从经验观点给人的印象更为深刻。由于理论缺乏直观性及其程式的不熟悉，许多物理学家对它抱怀疑态度。他们想看看这理论是否也富有经验成果，能否处理自然中实际发生的简单物理系统。一个最低的要求就是：它可以重现跟玻尔的旧理论一致的氢原子的能谱。泡利和狄拉克独立地按量子力学处理了非相对论的氢原子，1926年初证明它给出了正确的结果。与此同时，从分光镜证据丹麦物理学家沙缪尔·哥德斯米特和乔治·乌伦贝克引入电子自旋假说。这个极端重要的发现，不是被量子力学的所有创造者们看好的。玻尔和泡利从开始就反对电子自旋的概念，其中一个理由是它似乎跟氢的精细结构不一致。可是，更仔细的考察证明自旋与量子力学之间没有冲突，并且，1926年春，海森伯与约丹利用自旋量子力学的简单形式推导了氢原子的精细结构，跟索末菲尔德公式近似



一致。这是令人满意的；甚至更为令人满意的是：它也成功地说明了反常塞曼效应这个纠缠早期量子论的老问题。至此为止，量子力学尚未作出过一种新颖的单独预言。

薛定谔方程

奥地利人埃尔文·薛定谔，苏黎世大学教授，不属于哥本哈根-哥廷根-慕尼黑传统。他从事过各种领域的研究，包括放射性、广义相对论、热力学和气体理论，但没有显示出对分光镜学或原子理论有太多的兴趣。当他开始发展波动力学时，他留意到海森伯的新理论，但那是一个对他无吸引力的、激励不了他的理论，相反，但当他撰写他的三篇论波动力学论文中的一篇时，声明：“我绝对没有意识到跟海森伯的任何继承关系。我自然知道这理论的事，但那超常的令我难于接受的代数，以及缺乏直观性，使我望而却步，如果不说将它排斥。”（Moore 1989, 205）与海森伯、狄拉克、约丹和泡利相比较，埃尔文·薛定谔不仅是保守的，而且，年纪 39 岁，他也是“年长的”。但是，事实证明这不是太糟糕的。1925 年从事气体理论研究时，薛定谔研究了一个不太熟悉的法国物理学家路易斯·德布洛意的工作。他在其 1924 年学位论文中提出物质与波动之间的深层二重性，试图把量子论与相对论连接起来。德布洛意提议把爱因斯坦 1905 年关于光量子和物质的两个能量公式通过简单猜测的关系结合起来： $h\nu = mc^2$ 。这就是说，按德布洛意质量为 m 的粒子可赋予一个频率，被一个相位波所表征。德布洛意用他的思想对索末菲尔德量子化条件给出一种波动解释，并预言一束以动量 p 运动的电子应展示波动性，波长为 $\lambda = h/p$ 。这结果陈述了著名的德布洛意波长，对一切粒子均有效，可从随后的量子力学导出。人们并不喜欢接受这理论，而且，被巴黎以外的大多数物理学家所忽视。法国理论

物理学在原子物理学家中名气不高，而且，人们不期望任何有趣的事会从巴黎传来。法国官方的联合抵制德国科学，更使得外界对法国才俊瞥一眼不容易。可是，爱因斯坦发现德布洛意的某些想法在他自己关于气体的量子论（玻色-爱因斯坦分布）工作中是有价值的，并且，通过爱因斯坦，它们被薛定谔所用。他自己原先也是因为气体理论而对德布洛意理论感兴趣的，但在1923年末，他通过用德布洛意的波粒二重性的激励集中于原子的一种新的波动理论。得出结论是氢原子波动方程的求解会给出能量的本征值——即氢光谱。这第一个薛定谔方程，跟德布洛意理论一致，是完全相对论的，因而期望产生索末菲尔德的精细结构公式。可是，当薛定谔最后成功解出这方程时，他发现：虽然它们给出一种精细的结构公式，却并不再现正确的谱。一定有什么地方出了错。薛定谔决定只发表非相对论近似和得到的玻尔公式。

薛定谔关于波动力学的工作，发表在1926年春与夏《物理学纪事》，标题为《作为本征值问题的量子化》的4篇长论文中的一篇。这位奥地利物理学家以几个不同方式引入其基本的波动方程，没有一个反映那条原先引导他发现该方程的思路的。重要的事是能量值本征方程本身。对于在势能 V 的力的作用下的单个粒子，他把它写为 $\Delta\psi + 8\pi^2m/h^2(E - V) = 0$ 。对于氢原子， $V = -e^2/r$ 。薛定谔注意到：如果把动量换成作用于波函数 Ψ 上的微分算符 $h/2\pi i \partial/\partial x$ ，那么，这方程就会来自经典的运动方程 $E = p^2/2m + V$ 。量子条件不是近似地被引入的，而且，在某种意义上，是满足方程的波函数的单值性所要求的。沿着这同一思路，薛定谔相信，他已经用波动理论解释了玻尔的不连续的量子跃迁，一个他根本不喜欢的概念。“几乎没有必要指出，”他提醒《物理学纪事》的读者，“把一次量子跃迁理解为从一种振动模式变到另一种模式的能量变化，是多么令人喜悦。振动模式的变化可作为时空中的一个连续过程来处理，只要辐射过程持续着。”



(Jammer 1966, 261) 同样，在一封致洛伦兹的信中，薛定谔把玻尔的光辐射模型描绘成“可怕的”与“实际上几乎不可思议的”。他摆脱了这样的怪物，显然是兴奋的：“我极其快乐，首先，达到了这样一个图像，在其中，至少以被我观察到的辐射光的频率实际发生着某种事情，俨如一个被追逐的逃亡者的喘气一样。我觉得，这种事情在形式上就是振幅以一定的节拍周期地涨和落。”(MacKinnon 1982, 234) 1926 年夏，薛定谔引入了能量算符 $E = -\hbar/2\pi i \partial/\partial t$ ，并把含时间的波动方程表述为 $i\hbar/2\pi \partial\psi/\partial t = H\psi$ ，或简单地， $H\psi = E\psi$ ，这里 ψ 是时间和空间坐标的函数， H 是哈密顿算符。在同一时期，他意识到：波函数必须是一个复函数，而不是原来认为的实函数。

相对于竞争中的量子力学系统，薛定谔的波动力学具有巨大的优越性。特别地，它是建立在其他理论物理惯用的数学概念和操作基础之上的，因此更易于在实际计算上使用。那些不熟悉数学工具的物理学家可以在 1924 年出版的理查德·克朗特和戴维·希尔贝特的《数学物理方法》找到它们，碰巧这书刚好覆盖了新量子力学所需要的各种方法。除了易于计算，波动力学也没有矩阵力学那么抽象，而许多物理学家喜欢从概念角度看问题。薛定谔推导的大多数结果，通常与以更臃肿的方式从量子力学得到的结果相重复。例如，薛定谔发现谐振子的本征值是 $E_n = (n + \frac{1}{2})h\nu$ ，结果跟海森伯发现的一样。量子力学与波动力学两者基于对自然完全不同的概念，使用着极不同的数学工具，在应用于简单的物理系统时，却给出相同的结果，这究竟是怎样发生的呢？在早期就有人猜测这两个理论是数学（但不是物理）等价的。1926 年春，薛定谔证明：任何波动力学方程都可变换为一个相应的量子或矩阵力学方程，反之亦然。美国的卡尔·埃卡特独立地提供了等价性的证明；泡利也对此作出了证明，只是没

发表。

至于波函数的本性和意义问题，薛定谔不是很清楚。有一段时间，他想把粒子理解为波，就是说，纯粹由中心波包构建粒子。可是，物质的这种波模型遇到困难，而到 1926 年，薛定谔提议：通过乘积 $\psi\psi^*$ (ψ^* 是 ψ 的复共轭)，波函数是一种电荷权重函数，电荷密度由 $e\psi\psi^*$ 表征。按照这一图像，电子因而不是尖锐定域的粒子，而是在空间模糊不清的。不久后，玻恩在研究碰撞过程中，提出了他的著名的几率解释。根据这一解释， $\psi\psi^* dV$ 是处于 ψ 态之中的粒子位于体积 dV 的概率。玻恩的几率解释很快被泡利、约丹、狄拉克和其他人所采纳与发展。由于它把可能性的一种不可约要素引入到微观物理学之中，这种解释具有重大的意义。这意味着自然定律意义的一种变化，但不是说，在物理学中因果定律不再是基本原理了。如玻恩在他 1926 年夏的论文中所表述的，“粒子运动遵从几率定律，但这几率本身是按因果性定律传播的。” (Jammer 1966, 285)

薛定谔波动力学原先是被哥廷根和哥本哈根的量子物理学家们怀疑地、甚至敌视地接受的。他们倾向于考虑后果地强调对于诸如时空连续性和直观性之类的因果性质。海森伯向泡利报告他发现薛定谔理论是“令人厌恶的”，但是，他们承认薛定谔体系的力量，而在等价性证明之后，他们中的大多数人对于量子力学的两种表述形式采取一种实用的态度。绝大多数物理学家使用波动力学的语言与数学，但按照玻尔、海森伯和玻恩的思想解释薛定谔的理论。在波力学的玻恩几率解释之后，如何推广它使之相关于矩阵力学，便是当务之急了。在这一过程中，导致量子力学成为一个完全一致的统一表述形式的决定性一步就是，由狄拉克和约丹独立发展起来的变换理论。利用这一理论，量子力学获得了一个雅致的数学结构，薛定谔与海森伯表述形式的差别，意义就不大了。



即令这种令人满意的状态以及量子力学在分光镜学与物理学其他领域的许多成功，这个理论不是没有问题的。例如，相对论与量子力学的关系问题。如果量子力学真的是微观世界的一个基本理论，它就应该跟宏观物体的基本理论——（狭义）相对论——相一致。然而，从一开始就是显而易见，情况并非如此，构建一个相对论的量子波动方程并不太难。薛定谔已经私自构建过了，奥斯卡·克莱因、瓦尔特·戈登和其他物理学家在 1926 ~ 1927 年间也构建过了。不幸的是，这个称为克莱因-戈登的方程，并不产生氢的正确的精细结构，从而证明它不能同 1927 年泡利提出的自旋理论结合起来。1928 年 1 月当狄拉克发表他的经典论文《电子的量子理论》时，问题解决了。这论文包含一个相对论波动方程，它自动地包容了正确的自旋。狄拉克方程具有跟薛定谔方程一样的形式， $H\Psi = i\hbar/2\pi \partial\Psi/\partial t$ ，但哈密顿函数是 $\partial\Psi/\partial x$ 的一级形式，包含一些 4 行 4 列的矩阵；相应地，狄拉克波函数具有四个分量。最令人瞩目地，对于未事先引入自旋的电子，方程包含了正确的自旋。在某种意义上，在史无前例的意义上，如果自旋未被经验发现，它也会从狄拉克理论中演绎出来。当关于氢原子的狄拉克的本征值方程，证明能准确产生出跟索末菲尔德 1916 年所导出的一样的能量方程时，新理论很快就被接受了。狄拉克的相对论波方程标志着量子力学的英雄开拓者时期的终结，也标志着一个新时期的开始。不久就证明：这方程包藏着种种惊奇、各种微妙以及许许多多狄拉克在推导这方程时未曾梦想到的问题。

传播与接受

量子力学急速地从哥廷根以及被少数几个别的理论构建中心传播开来。新观念和新结果的传播是通过科学期刊、学术会议等

正规方式以及信件、手稿交往非正规方式进行的。只有很小一群欧洲物理学家加入到围绕哥廷根和哥本哈根组织的信息网络之中。他们享有外界所没有的快捷通讯的优越性。从1925年夏到1927年春，关于量子力学的出版物呈爆炸态势，两个月的出版量相当于两年的出版量。1925年7月到1927年3月200多篇关于新理论的论文递交给科学期刊；从主编接受手稿到文章付印发表的时间常常是很短的。例如，1926年1月《皇家学会进展》收到狄拉克关于氢原子光谱的论文；同年3月1日该文就发表了。玻恩的关于碰撞问题的出版甚至更快。《物理杂志》于1926年6月25日收到稿子，7月10日就发表了。有一种关于出版速度的说法：按照《物理杂志》的政策，凡“有名望”的物理学家的手稿一概不得拖拉发表。马克思·玻恩肯定是一位有名望的物理学家。当时《进展》的规则里，有皇家学会的会员可以被另一位通讯推荐论文一项，这样就省掉了评稿人。狄拉克的论文就是由皇家学会会员拉尔夫·弗勒通讯推荐的。

保持跟文献齐头并进是一项艰难的工作。爱德华·康顿回忆当时随量子力学发展的步伐：“那时（1920~1921年间），伟大的思想如此快速地冒出来，以至人们得到一个令人沮丧的关于理论物理常规进展的印象——在大多数时间里，人们都犯了智力消化不良的毛病。”（Sopka 1988, 159）氛围是高度竞争的；经常发生这样的情况：新的结果被不同的物理学家独立地发表，或者，由于被竞争的同事击败了，物理学家不得不放弃发表其结果。在这种出版游戏中，德国物理学家及其在哥本哈根的同盟者有一种优越性，即容易并快速接触相互的、已发表或未发表的结果。相反，美国通常至少必须等待一个月才能读到德国物理期刊中的文章。当时量子力学的竞争精神被约翰·斯拉特描述过，他在1926年5月致玻尔的一封信写出了他那时因出版节拍慢而产生的挫折感：“在美国这里，从事跟量子力学一样迅速的事务是很难的，



因为要花更长一段时间才能听到什么正在发生，而等到知道了的时候，或许欧洲有人已经做了相同的事。”（Kragh 1990, 21）

泡利曾经称量子力学是孩子的物理学——因为这么多的贡献者还只有 20 多岁的年纪。例如，1925 年 8 月海森伯 23 岁，约丹 22 岁，而狄拉克刚满 22 岁。早一代量子物理学家半数以上，即在这段时期对量子力学做出贡献的 80 人左右，是在 1895 年以后出生的。他们撰写了所有论文中的 65%。这些辉煌的年轻物理学家中许多人自负地觉得量子力学是属于他们的，而年长的物理学家简直掌握不了它。“活了 30 年之后不成老翁是很难的，”新一代物理学年轻帮中一个 20 岁的弗里德里希·冯维兹瑟克 1932 年回忆说，“我觉得一般的态度只是一种……充满着骄傲的态度，一种超越于理论物理学老教授、每一位实验物理学家、每一位哲学家、政治家，以及你在世界上发现的任何一种人的自我满足的优越感。”（Kragh 1996b, 89）如表 11.2 所示，德国及其邻国主宰着量子力学的早期阶段。不论量子物理学家是不是德国人，量子力学的语言是德语。最重要的期刊是《物理杂志》，许多非德国人在期刊中发表他们的结果，这包含 1925 年 7 月到 1927 年 3 月之间 68 篇论量子力学的论文。法国的弱势地位也值得关注。在那里，量子力学只是缓慢地传播着，没有具有重大意义的贡献。在这时期，对量子力学文献做出贡献的，只有路易斯·德布洛意和里昂·布里渊。

跟相对论相比较，量子力学发展神速、传播极快，而且，未受阻力。另一个不同之处是，量子力学几乎不吸引公众的兴趣。爱丁顿是为数不多为非科学读者写过这一理论的人之一。

虽然量子力学不会比相对论更不直观，不存在跟 20 年代不可小观的反相对论文献的量子对应理论。由剑桥物理学家乔治·贝特维斯托写的《新量子力学》似乎是最具专业水平的第一本教程，这本出版于 1928 年的书详细评述了矩阵力学与波力学

表 11.2 量子物理学的出版物与作者一览表 (1925 年 7 月到 1927 年 3 月)

国家	作者数	他们撰写的论文	论文的语种	出版国家
德国	19	59.5	54	120
瑞士	5	17	21	0
奥地利	5	7	6	0
丹麦	4	7	17	1
荷兰	2	4	5	1
中欧, 合计	35	94.5	103	122
法国	2	12	12	14
英国	6	15	18	30
美国	19	34.5	26	27
前苏联	11	11	11	9
意大利	3	4	4	1
瑞典	2	6	5	0
其他	3	5	3	0
合计	81	182	182	203

注：前两列并非指作者的国籍，而是指该期间所逗留的国家。第二列中的论文数包括原始论文与评论文章，但不包括译文与初级注释，它们包括在第四列之中。第三列示出外国访问者的效应。来源：基于 Kojevnikov and Novik 1989 中的资料。

的主要内容，从 1923 年的物质波到玻尔的互补原理。其他的单行本包括阿瑟·哈斯的《物质波与量子力学》(1928 年)，外尔的《群论与量子力学》(1928 年)，索末菲尔德对他的《原子构造与光谱线》的波力学增补 (1929 年)，爱德华·康顿和菲力普·莫尔斯的《量子力学》(1929 年)，以及玻恩和约丹的《初等量子力学》(1930 年)。最后一本书，以抽象的矩阵力学而不



是以更易于应用的波力学为基础，是不成功的。在早期关于量子力学的著作中，最有影响的无疑是狄拉克 1930 年的《量子力学原理》，它历经几个版本和译本。尽管抽象与不适合一般教学法，它却是 30 年代一部关于量子力学的标准著作。

虽然美国物理学家没有太多地参与早期量子力学工作，但在美国，新量子力学是被一个强势增长着的物理共同体饥渴地与积极地接受的。在 20 年代后半期，美国物理学成熟了，跃居成为世界物理学的主导地位。例如，美国物理学会的会员与研究员数从 1920 年约 1 100 人急速上升到 1926 年的 1 800 人，1930 年的 2 400 人。相应地，《物理评论》的篇幅与重要性都上升了。1929 年，2700 页的期刊发表了 281 篇论文，其中约 41 篇是涉及量子力学的各种问题的。应当时的更广泛地评论量子力学的需求，1929 年《现代物理评论》的创刊的头两期以《物理评论增补》的面貌出现。第一篇评论文章是埃德文·肯布尔和爱德华·希尔的《量子力学的一般原理》，它覆盖了矩阵力学和波力学，有 100 页以上。在美国如此迅速而顺利地接受量子力学的一个重要的理由是，年轻的美国物理学家们赴欧洲的旅游，以及欧洲量子物理学家到美国各大学的访问。在 20 年代末 30 多名美国人在哥廷根、慕尼黑、苏黎世、哥本哈根和莱比锡等欧洲理论物理中心学习。欧洲物理学家的造访和旅游讲学是司空见惯的事，而这包括像索末菲、德拜、海森伯、狄拉克、克拉默斯、洪德和布里渊一样的开拓者。波恩在 1926 ~ 1927 年间在马塞诸塞技术学院讲学和美国其他大学的讲学具有特别重要的意义，因为它们是在理论尚未完成的时候，向美国物理学家介绍量子力学。

20 年代见证了物理学的内部结构，从实验工作向理论工作的令人瞩目的转移。在 1910 年，世界物理文献只有 20% 的论文是理论性的；而至 1930 年百分比就接近了 50%。这种转移是一种

世界范围的趋势，不仅仅由新量子力学引起，而且这种变化在美国具有特别重要的意义，在那里，传统上理论研究一直比欧洲弱势。虽然没有美国人参与量子力学的创建阶段，但他们很快赶了上来并在第二阶段做出重大的贡献。美国早一代量子物理学家中有：卡尔·埃卡特、约翰·斯拉特、约翰·范弗列克、戴维·丹尼逊、罗伯特·奥本海默，以及化学家李纳斯·泡林。像大多数其他第一代量子物理学家一样，他们主要从事量子力学理论方面的工作。

许多欧洲物理学家深深地思索着新力学的哲学蕴涵，花大量时间讨论理论上奇异的非定域性的更广泛意义。物理性质只作为测量结果而存在吗？如果这样，被观察的世界就是真实的与客观的吗？主、客体能被分开，或者，它们形成一个不可分的整体？量子力学的教训可以外推到社会与文化吗？对于玻尔、海森伯、约丹和其他人来说，理解这些性质跟利用新技术来计算物理问题一样重要。美国人的态度是很不一样的。虽然美国人中对于基本议题有相当的兴趣，但他们不太关注更深层的、跟量子力学相关联的哲学问题。这些问题不能进入美国物理学家所发表的论文和著作之中。他们的态度是实用的、受操作主义的激励的。布里奇曼的《现代物理学的逻辑》奠定了操作主义的基础。按照这种态度，实验的结果是实质，其意义可被讨论；因此，量子物理学家的的工作就是从事可被实验检验的计算。斯拉特 1937 年所述的哲学（或反哲学）观被美国绝大多数物理学家所接受：

在这些日子里，一个物理学家只关心其理论的一件事：如果他们用它来计算一个实验的结局，那么，理论预言，在极限限制内，必须跟实验结果一致。他通常并不争辩其理论的哲学蕴涵。……关于一个理论是否影响其正确预言实验结果的能力的问题，在我看来，是词



语问题，而不是更实质的东西。我十分满意把这些问题留给那些从中找出某种满足的人们。

哥本哈根精神——即玻尔的互补原理以及相应的对于量子过程的解释——美国人给予的反应是冷漠，正好和它激起许多欧洲大陆物理学家兴奋度成反比。当然，并不是美国人对互补原理缺乏兴趣，而是美国物理学家——包括那些在哥本哈根与玻尔相处过的人——没有看到玻尔哲学仍有可关注之处。“我不完全喜欢它，”1963年狄拉克关于互补原理回忆说，“它不为你提供你原先不知道的任何方程。”（Kragh 1990, 84）对于狄拉克，这个理由足以使他不喜欢这个原理了，而这也就是他的美国同事们的态度。

当量子力学来到时，理论物理学实际上局限于欧洲和北美洲。现代物理学来到日本较晚。在日本，现代物理学只在30年代才起飞。日本的前驱是Y·仁科方雄，他在20年代大部分时间呆在欧洲，在哥本哈根与玻尔共处6年。量子力学的引入，部分地是由于通过邀请西方人讲学，包括奥托·拉波特、索末菲尔德、狄拉克和海森伯。从1931年起，仁科方雄在京都大学开始讲授量子力学，使用海森伯的《量子力学的物理原理》和后来狄拉克的《量子力学原理》作教材。仁科方雄的努力，在创立强大的、30年代崛起的理论量子物理学派中，起着中介的作用。

第十二章 | 核物理学的崛起

电子-质子模型

在原子结构的有核模型被接受不久，个别物理学家就开始猜测原子的细核结构。基本的观点是由卢瑟福提出的，即核是由电子与正电单位粒子所组成，后者等同于氢核，常称为“正电子”或 H^+ 粒子；或者从 1920 年起，叫做质子。核中包含电子是显而易见的，因为正电荷显然需要某种负电荷以阻止核爆炸，而且，从 1913 年起，就知道 β 电子来源于核，而不是外层电子。玻尔与其他人都拥护这种观点，他在其 1913 年的工作中指出：“两个显然相同的元素〔同位素〕以不同的速度发射 β 粒子的事实表明： β 射线与 α 射线均源于核。”（Bohr 1963, 53）

按照有核的原子模型，质量数 A 和原子序数 Z 都依赖于质子数 (p) 和电子数 (e)： $A = p$ ， $Z = p - e$ 。但是放射性物体的核也产生 α 粒子，因而它常被认为是核的附加成分。对于有 a 个粒子的核来说，方程应该是 $A = 4a + p$ 与 $Z = 2a + p - e$ 。在 1915 ~ 1932 年，这个假说被普遍认可。其实，似乎不止一个物理学家怀疑核的电子假说，怀疑所谓的双粒子规范，该规范称一切物质均由电子与质子组成（虽然它们中有一些可能以捆绑成 α 粒子或其他组



合的形式存在)。然而这两三种核物质在核中是怎样构建的，已知实验证据贫乏，在 20 世纪 10 ~ 20 年代，要构建可信赖的核模型，确实是一项没有希望的任务。然而，数量令人吃惊的物理学家（还有化学家）不因重重困难所造成的失败而气馁。他们多少自由地猜测着核的结构，想象的模型是纯思辨的。常以松散的数字占卜术为基础，但有时却具有极严肃的本性。例如，1918 年慕尼黑物理学家威廉·楞茨构造了一个符合量子规则的 α 粒子模型：4 个质子在一个赤道平面上旋转，每个极点处有一个电子。索末菲尔德在他的《原子构造》中赞许地提到这个模型。

最杰出的老一代核物理学家也是最富创造力的模型构造者，他们不乏推理力。受其早期 α 粒子散射理论的激励，卢瑟福 1920 年在贝克莱因的讲演中提出：除了电子、质子、 α 粒子之外，在核中可能存在别的粒子。卢瑟福认为有证据证明存在轻的氦核，它由 3 个质子捆绑 1 个电子所组成（卢瑟福的记号是 X_3^{+} ），或许，还有一个重的氢同位素，由 2 个质子和 1 个电子组成。还有——为何不呢？——核也包含由 1 个电子和 1 个质子组成的中性粒子，卢瑟福称之为“中子”。就在这情形中，卢瑟福也引入了“质子”的名称。卢瑟福特别着迷于可能存在中子，因为它们会“容易进入原子的结构之中，既可跟核结合在一起，又可因其强场而被瓦解，从而产生一个带电的 H 原子〔质子〕或一个电子或两者的逃逸”。（Badash 1983, 886）卢瑟福可能没有意识到：他的“中子”早在 1899 年就被奥地利物理学家威廉·舒瑟兰德提出，他提议以太是以正、负电子双重态组成的。舒瑟兰德的提议被楞茨在其权威教程《理论化学》中使用，出现于 1903 ~ 1926 年的所有版本中。轻氦核的想法因证据过于微弱，于 1924 年被摒弃；而中子假说则有一个较长的寿命，在剑桥被认真地对待。詹姆斯·查德威克跟卢瑟福一样相信它的存在，并试图在 20 年代的若干场合中探测这假想的粒子，1932 年以前未获成功。而在

探测到时，证明观察到的根本就不是卢瑟福的中子。卢瑟福继续发展其关于核结构的思想，并于1925年形成结论：核是由很重的核被正、负卫星（正、负电子）环绕所组成。卢瑟福的卫星模型重要而有说服力，查德威克和查尔斯·D·埃利斯把它纳入他们的《来自放射性物质的辐射》一文中。

卢瑟福的大多数假说是以对于物质被 α 粒子轰击的实验的解释为基础的。1917年他致信玻尔：“我探测并观察到较轻的原子核，它们是被 α 粒子及其产物轰出来的。我想，对于核附近的力的特征与分布投射一柱光线。我也试图用这方法把原子炸开。”（Stuewer 1986a, 322）这些最重要的实验，是1919年在卢瑟福离开剑桥前往开文迪什实验室任主任前不久在曼彻斯特做出的。

卢瑟福研究了 α 粒子对不同气体的作用，探测由作用形成的长程粒子所产生的闪烁。利用纯氮，他观察到他称之为反常的一种效应，即长程粒子的产生类似于用氢所得到的效应。“很难避免做出结论，”他写道，“这些出自于 α 粒子与氮碰撞的长程原子不是氮原子，而可能是带电的氢原子，或者，质量为2的原子。如果情况如此，我们必须得出结论：氢原子是在飞驰的 α 粒子的碰撞中演变出来的强力作用下被分解出来的，而且，释放出来的氢原子原是氮核的一个组成部分。”（Beyer 1949, 136）在开文迪什进一步的工作证明卢瑟福的结论很大一部分是正确的。他是第一个成功分解了一个原子的核的人，从而开辟了现代炼金术历史的新纪元。这过程是 $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + ^1\text{H}$ ，虽然卢瑟福原先把它解释为 $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{13}\text{C} + ^4\text{He} + ^1\text{H}$ 。直到1914年，云室照片的反冲的原子中没有显示任何 α 粒子的痕迹，卢瑟福的错误才被更正。

在接下来的年岁里，卢瑟福和他在开文迪什的团队继续这类实验，希望变换出更多的元素来。类似的工作在维也纳的镭研究所进行，但未获得相同的结果。有鉴于卢瑟福和查德威克既未找到比钾元素重的元素，也未找到铍与锂元素分解的证据，维也纳



物理学家格哈德·克什和汉斯·彼特逊（后者是瑞典人）宣布：在分解元素中有了巨大成就。他们不仅报道了广泛不同于剑桥所得到的结果，而且，他们还攻击卢瑟福关于核的卫星模型。分歧演化成一场旷日持久的争论，有点带有世纪之初名声不好的N射线的那种味道。由于1927年查德威克对维也纳研究所作的一次访问，他发现奥地利-瑞典人团队并没有控制其结果，闪烁记数值系统地比他们发现的偏高。按照一位历史学家的说法，“记数是由妇女做出的，认为她们做事比男士专心，不开小差，而且，雇佣的是斯拉维克妇女，因为她们的眼睛大而圆，适合于记数。这些妇女被告之预期的结果是什么，她们渴望得到欣赏就告许这些结果。”（Badash 1983, 887）

20世纪20年代的核物理学家的的工作密切相关于放射性，因为高能 α 粒子与 β 粒子的唯一源泉出自天然发生的放射性物质。闪烁的可视记数可追溯到1908年，当时柏林大学的埃里奇·瑞吉纳得出结论：每当 α 粒子袭击磷光屏就产生一次闪烁。为了测量粒子的强度和方向，由于它们是由原子分解所导致的散射或生成的，通常使用一些简单的闪烁装置。30年代初以前，这个简单的方法一直被广泛地使用着。卢瑟福1919年的实验并不使用比盖格和十多年前前马斯顿的 α 散射实验所使用的更先进的仪器。缺乏资金和可行的技术使得卡文迪什实验简单，而跟卢瑟福本人偏爱的腊封与弹簧方法相合。然而，并非全是腊封与弹簧。在核物理学的幼婴阶段，最重要的仪器之一是电磁质量摄谱仪，它是由弗兰西斯·阿斯頓从其1919年的第一版本演化而来的。到20年代末，摄谱仪已经变成一台复杂而昂贵的仪器了。

20年代初，云室在探测中开始起重要作用。使用突然膨胀法使电离液滴痕迹可见，这原理是开文迪什实验室的查尔斯·T·R·威尔逊于19世纪90年代从事气象学课题时发现的。到1911年威尔逊构造了第一个云室用来研究电离粒子的痕迹，并拍摄了

第一张照片。1921年，一位在开文迪什工作的日本人，T·清水，发现了使云室自动工作的方法。这技术很快被帕特里克·M·S·布拉克特进一步改进。实际上，关于闪烁和云室的技术的所有革新都是在开文迪什实现的。开文迪什也是气体电离云室和计数器的诞生地。早期电离计数器的最有影响的版本是由汉斯·盖格于1913年设计的。由于战争的爆发，盖格回到德国在炮兵部队服役；1918年以后，他继续从事电离计数器工作。现代高敏感的盖格-缪勒计数器是一项德国人的发明。它是1928年由盖格和他在吉尔大学的同事沃尔瑟·缪勒发展出来的。20年代和后来探测技术的发展在很大程度上归功于电子工程，特别是真空管电路的利用。

量子力学与原子核

量子力学是原子与电子的一般理论。人们认为它对于原子核也成立，但在量子力学的初始阶段，没有人试图把新理论应用于核物理学。1928年当 α 放射性可用量子力学加以理解时，情况发生了变化。 α 衰变的重要量子力学理论是由哥廷根的乔治·伽莫夫与普林斯顿的罗纳德·格尼和爱华德·康顿独立地提出来的。伽莫夫，24岁的俄罗斯物理学家，主张（如早先卢瑟福所做的）：核的势必定短程强引力，在它融会到排斥的库仑势之前到达一个最大值。他把 α 粒子想象成先前就在核中，在势阱中作振动与轨道运动。经典上， α 粒子没能力穿透这个势，但按照玻恩对薛定谔方程的解释，粒子有个小的几率以低于势的高度的能量从核中逃逸出来。这就是著名的粒子或物质波穿透或“隧穿”一个势垒的例子。这案例今天已经写进一切量子力学的初等教程，但在1928年，它却是一个新颖而令人振奋的现象。

伽莫夫利用量子力学使他得以找到穿透几率，并把它转换成



衰变常数，导出衰变常数的对数与被发射的 α 粒子的能量之间的线性关系。这正好就是因 1912 年盖格和英国物理学家约翰·纳托尔的工作而为人知晓的经验关系。以前也有盖格-纳托尔关系的各种推导——例如，1915 年弗雷德里克·林德曼的——但这些说明都是以特设假设为基础的。伽莫夫的说明，以及由格尼和康顿提出的大体相同的说明，是更为令人满意的，因为它是以基本理论为基础的。伽莫夫-格尼-康顿理论是极为重要的，不仅因为它提供了量子力学应用于原子核的一个令人折服的示例，而且因为它构成了量子力学在核物理学的其他应用的基础。

放射性自这个世纪的前期面世以来，它的自然属性一直困扰着人们。物理学家们为了对其起源提供一种因果说明，付诸了大量的努力。但是，量子力学使人们终于认识到这些试图弄清放射性属性的努力是徒劳的，如格尼和康顿 1929 年针对这些努力所评论的：“只要我们一直接受那个粒子行为决定地被条件所确定的动力学，这就是一个不解的难题。我们不得不考虑核的分解归因于核粒子的轨道运动中诸多独立事件域的非惯常连通。然而，我们现在把全部责任放在量子力学的定律上，认识到粒子的行为处处是等价地被几率支配的。”（Kragh 1997a, 357）

在 1928 年以后几年里，量子力学成功地应用于涉及原子核的其他几个问题中。其中碰撞问题是特别重要的。例如，1929 年，尼维尔·莫特，一位 23 岁的剑桥物理学家重新导出了卢瑟福 1911 年关于荷电粒子从点状核散射的表达式。更有趣的是，两个相同粒子（如 α 粒子被氦核散射）之间的碰撞，他预言一个跟卢瑟福不同的结果，即对于 45° 的低速散射出现 2 倍于经典预期的频度。这预言于 1931 年被帕特里克·布拉克特和弗朗德·坎姆皮昂的云室实验证实，它是在核领域内量子力学的首批预言之一。

伽莫夫、莫特、格尼和康顿的工作，并未对核的结构投射任

何新的眼光。核仍然被假定是由电子与质子所组成，这些是仅知道的基本粒子；还知道放射性核以 β 粒子形式放射电子。但是，在 20 年代晚期，人们渐渐认识到：电子或许在原子核中不应该有其地位。它们是必要的，但不受欢迎。电子-质子模型的问题之一是，它与实验上确定的核统计不一致。 N_2^+ 分子的旋转能谱研究表明：氮核的自旋必须是 1，但如果核由 14 个质子和 7 个电子组成，奇数粒子的自旋是一半，它应该为 $1/2$ 自旋。测量与理论预期之分歧是由拉尔夫·克朗尼希指出的。他于 1928 年提出：“或许人们不得不假设质子与电子不保持其核内与核外的一致性。”（Pais 1986, 301）在当时，不论是克朗尼希还是别的人能够具体地把问题捅破。第二年，拉曼谱系的研究确证了氮核遵从玻色-爱因斯坦统计，就是说，它具有整数自旋。在哥廷根，瓦尔特·海特勒和格尔哈德·赫兹伯格扩大了克朗尼希的结论：“似乎电子连同其自旋在核中消失了，它也不参与核的统计学了。”（Pais 1986, 302）

甚至比氮反常更为重要的是关于 β 谱的理解问题。1914 年查德威克发现 β 放射性的谱是连续谱，虽混有一个线谱。按照查德威克与开文迪什物理学家的意见，连续谱是实在的，而分立谱则源于，比方说，电子系统中一种如查尔斯·埃利斯 1922 年提出的内层光电效应。可是，不假定 β 电子是以连续域中能量发射，有可能说明这个连续谱。在柏林，李瑟·迈特勒提议电子开始以相同的能量发射，但有时能量转化为 γ 辐射，它可产生二级 β 射线。迈特勒的另一种说明导致一场跟开文迪什科学家的旷日持久的争论。这争论到 20 年代后期，才因实验证明跟迈特勒的理论不符而得到解决。现在已牢固确立连续 β 谱源于核。可是，从理论观点看，这个结论是最不舒服的。按照量子力学，核只能以分立的能态存在；假设能量守恒，产物为一个子核和一个 β 电子的二粒子衰变，是不可能再生出连续谱的。



把自旋统计问题与相对论量子力学一并考虑，连续 β 谱导致 1929 ~ 1931 年一部分物理学共同体中的一场危机。尼尔斯·玻尔对危机的回答是根本性的，即能量守恒在 β 衰变中不成立。在 1929 年 6 月一份未发表的注释中，他强调：“我们现在为 β 射线分解问题的理论处理所具有的基础是何其少，”他继续写道，“事实上，来源于原子核内部的电子的行为似乎完全落在通常力学概念一致应用范围之外，甚至在其量子理论修正之外。鉴于能量与动量守恒原理具有经典渊源，提议它们不能说明 β 射线的发射，在量子理论的现阶段几乎不能事先持反对意见。”玻尔继续支持能量不守恒至少达 3 年之久。他受到若干年轻物理学家的支持，包括伽莫夫与朗道。伽莫夫是现代意义核物理学的第一本教程——《原子核的组成与放射性》的作者，前言写于 1931 年 5 月 1 日。当时核物理学仍是一个发生中的领域。该书用了 114 页的篇幅，旨在“对于原子核的本性给出现有实验知识与理论知识的一个尽可能完全的说明”。伽莫夫赞许地提到了玻尔关于能量不守恒的思想，跟他在哥本哈根的大师见解完全一致地写道：“量子力学的通常观念在描述核电子中绝对失败，它们甚至似乎不可以视为个别的粒子，能量的概念也似乎丧失其意义。”

泡利的忧虑不比玻尔与伽莫夫少，但他不去掺和能量不守恒。1930 年 12 月在一封致迈特勒和盖格的“公开信”中，他提出， β 难题与 N-14 问题可以通过在核中引入一个中性粒子来解决：“[存在] 一种可能性，即在核中可能存在电中性的、我想称之为中子的粒子。它具有自旋 $1/2$ ，遵从不相容原理，以及不同于光量子，不以光速运动。中子必须具有与电子质量同数量级的质量，在任何情形中，不会大于 0.01 质子质量。假设在 β 衰变中一个中子和一个电子被一道发射，连续 β 谱就变得可理解了，即中子与电子的能量和是守恒的。”（Brown 1978, 27）泡利发表他的思想颇为犹豫，但它还是为物理共同体所知晓。在 1933 年

第7届索尔维大会的一次讨论中，他终于公开捍卫他的假说，他的发言发表在1934年的文献汇编中。当时，“重中子”已经发现，恩里科·费米提议称泡利的粒子为“中微子”。如他致迈特勒和盖格的信所表明的，泡利原先相信中微子是核的组成粒子，具有很小但非零的质量，还具有磁矩。按照这个假设，核由质子、电子和中微子组成。泡利假想的中微子破坏了二粒子规范，就这本体意义而言，它是革命的。可是，从方法论的观点，它是一个保守的理论，因为它的全部逻辑根据就是维护业已确立的能量守恒。

中微子开始时遇到阻力与冷遇。反对者中有玻尔，支持者中有费米。直到1934年费米的关于 β 衰变的成功理论之后，中微子才受到某种程度的尊重。但它仍是一个假想的粒子，广泛地被认为是超乎探测的。在1934年4月《自然》的一篇文章中，汉斯·贝特和鲁道夫·佩尔斯结论说：“没有实际可能的方法观察中微子。”一直到1936年，狄拉克还拒绝中微子，觉得能量不守恒是一种较好的选项。中微子不仅在 β 衰变中起作用，而且，在试图用核理论来理解电磁现象的努力中也要用到它。1934年，路易斯·德布洛意提议光子可理解为一对中微子与反中微子。他的思想在理论物理学家中引起极大的关注。在1934~1938年，这思想被约丹、克朗尼希、格雷戈·温泽尔和恩斯特·斯丘克伯格等人沿不同方向发展着。这方面的许多论文都不能同实验挂钩，并没有导致一个满意的光子中微子理论。到1940年，理论的大部分都被摈弃了，不是因为被证伪，而是因为它们无成果。

泡利的质子-电子-中微子模型只是若干个试图以新方式理解原子核的思辨性努力其中的一个。1930年，俄罗斯物理学家德米特里·伊万连科和维克托·阿姆巴朱米安基于狄拉克的新电子论提出一个 β 衰变理论。按照该理论， β 粒子并非预先存在于核中，而是跟一个质子一起从一个处于负能态的电子产生出来的。



还有一个短命的假说是海森伯约在同一时期的一封致玻尔的信中提出来的。他把世界设想成晶胞长度为 h/Mc^3 的晶格， M 是质子质量；他认为：核可理解为是由质子和他所谓的“重光子”所组成的。这模型的优点是避免了核电子，缺点之一是破坏了大部分守恒定律，包括电荷守恒。“我不知道你是否觉得这个根本性努力是完全疯狂，”他致信给玻尔说，“但我觉得核物理学不应该是过分廉价的。”（Carazza and Kragh 1995, 597）玻尔同一核物理学的诸多悖论要求理论有根本性变化，但他觉得晶格世界假说不是完全疯狂，也是够疯狂的了。经过在哥本哈根的多次讨论，海森伯搁置了他的想法，只是在 30 年代后期又回到其基本长度假说。1932 年他发现中性核粒子的另一个候选者——中子。

天体物理学的应用

核物理学，或确切一点说是核猜测，在它成形的早期就进入了天文学。原子构成的新洞见首先被用于试图理解物理学的经典神秘性，即太阳和其他恒星中的能量来源问题。在 1917 年，阿瑟·爱丁顿就猜想，能源可能是质子与电子湮没形成辐射能。这个假设的过程在天文学中讨论了十多年。归根结底，虽然不存在这过程的实验证据，也没有理由说它为何在恒星内部不会发生。作为一个可能的选项，爱丁顿 1920 年提出：能量可能来自于四个氢原子形成氦的过程中——那就是一个聚合过程。相对于卢瑟福新近的核试验，他说：“在开文迪什实验室中可能的事，在太阳中可能不是太难的。”这就是他的有力证词。爱丁顿知道：按照阿斯顿的质量摄谱测量，1 个氦核的质量比 4 个氢核的质量几乎小 1%。因此，合成反应会伴随可观的能量释放。密立根是另一位把新的核物理学应用于他的天体物理工作中的物理学家。虽然在他的情形中，靶子不是天体的能源，而是宇宙射线。在

1926~1930年的一系列工作中，美国物理学家证明：宇宙射线由不同的高能质子束组成，它们源于宇宙深处核的构造中。如他所描述的，这种射线是“元素诞生的哭叫”，或“穿过以太时发出的信号，宣布较重元素连续地从较轻元素中产生出来。”（Kragh 1996b, 147）按照密立根理论，宇宙的原子构造过程不是逐步发生的，而是一蹴而就的运动。较重元素直接从质子电子和 α 粒子中形成。这似乎让人感到有点离奇，但它不会比詹姆斯·金斯提出的另一个方案更离奇。那就是，恒星主要是由横贯元素组成，它会自发地变换成辐射。金斯认为变换不仅与通常的放射性衰变相关，而且与整个原子的湮没相关。在20年代里，宇宙过程的知识甚微，实验知识的缺乏只得求助于猜测。

随着伽莫夫关于 α 衰变的量子力学理论的问世，核天文学中一个较少思辨的新篇章开始了。奥地利物理学家弗里茨·豪特曼斯和英国天文物理学家罗伯特·德斯科特·阿特金森两人在德国做博士后研究。他们认识到伽莫夫的穿隧过程可以插入，从而可能说明元素是怎样从核反应中构造出来的。1929年的计算表明：在存在于恒星内部的假定条件下， α 粒子进入一个轻核之中的几率是微乎其微的。质子-核的反应发现是没有希望的，并且，豪特曼斯、阿特金森和伽莫夫合作导出一个捕获截面对于温度与靶核原子序数之间的一般关系式。这理论提示恒星能源可能是4个质子合并为1个 α 粒子的嬗变——这就是原先由爱丁顿提议过的过程。可是，按照豪特曼斯和阿特金森的看法，这过程不是爱丁顿的4粒子的不可能的碰撞，而是，轻原子核一个一个地捕获质子，并且，继后又把 α 粒子驱逐出去。爱丁顿的提议没有物理理论根基，而豪特曼斯-阿特金森理论则是一个定量的理论，它是建立在新近的量子力学知识之上的。这理论可算是对于现代天文物理学的开拓贡献之一——但当初是不太被关注的。

豪特曼斯-阿特金森理论预设了氢在恒星中大量地存在，这



个假设约在 1930 年仅仅获得天文学家的认可。此间，阿特金森移居美国，带着氢在恒星中起主导作用的新知识，极大地扩展了理论的 1931 年版本。当时尚不知有中子和氦核，氦不可能直接从质子构成，但阿特金森设计了一个循环模型。在这模型中，氦是由不稳核的分解而形成的。这样，他试图用质子捕获过程来说明整个元素域的丰富性。可是，只在 1932 年以后，特别是在引入中子之后，核天文物理学才开始提交真正有希望的成果。在 30 年代里，天文核物理学的开拓者有：美国的阿特金森、伽莫夫、贝特与 T·E·斯特尼，英国的哈罗尔德·沃尔克和德国的冯维兹瑟克、拉迪斯劳斯·法卡斯与保尔·哈特克。四个美国人的一个共同特点是都来自欧洲：阿特金森与斯特尼来自英国，伽莫夫来自俄罗斯，贝特来自德国。恒星形成以中子捕获为基础的思想是沃尔克和伽莫夫 1935 年独立地发展的。两位物理学家都受到流行实验室实验的鼓舞，如罗马的费米实验室、剑桥的科克科罗夫特实验室与沃尔顿实验室。沃尔克这样表述过恒星过程与实验过程之间的类似：“原子物理学家利用高电压与放电管合成元素，其方式是跟恒星内部所发生的一样，并且，被观察的过程导致上百万伏的能量的大量释放。这表明恒星内部维持着何等强大的辐射，以及它们的温度何以如此之高。”（Kragh 1996b, 92）

中子诱生核过程的早期思想，并不导致对于元素形成或恒星能源的一种满意的说明。后一问题的突破是 1938 年来到的，那多亏核理论的进展。汉斯·贝特，原先索末菲尔德的研究生、量子物理与核物理专家，1933 年逃离德国定居于科内尔大学。1938 年他出席了华盛顿特区天体能量问题学术大会。与会者不是天文学家就是核物理学家。虽然贝特原先没有天文学知识，但他利用其非凡的核物理学知识设计了一个太阳能量产生的详细理论，它很快就被认为是这领域后来一切工作的基础。沿着同一方向的一个不太确切的理论是冯维兹瑟克 1938 年提出的。贝特理论的实

质是通过一个循环过程 4 个质子聚合成 1 个氦核，在其中碳核起催化作用。跟先前理论相反，贝特理论基于详细的计算，其中各截面的数值由实验确定。核物理学计算使贝特得出结论：为了给出循环周期产生的能量，要求太阳中心温度必须达到 1.85 亿 K。这个数值跟基于太阳的天文模型所得到的数值出色地一致。贝特理论广泛地被物理学家和天文学家喝彩。斯德哥尔摩的诺贝尔委员会花了较长的时间——确切地说是 28 年——才承认这一数值。

1932 年，奇迹迭出的一年

1932 年，中子是一个已知但尚未显真身的粒子。1929 ~ 1931 年的物理文献有 10 多处提到中子，但这些全是卢瑟福意义中的电子-质子组合体。真实的中子于 1932 年春被发现，并在一年后被承认是一种基本粒子。事件的过程导致查德威克的著名发现。三年后，他为此获得诺贝尔奖。这过程始于 1930 年柏林帝国物理技术所的沃尔特·博特与赫伯特·贝克做的实验。这两个物理学家发现：暴露在 α 粒子中的铍产生他们相信是高能的 γ 射线。在巴黎，伊瑞妮·居里和弗雷德里克·约里奥考察了“铍射线”，并于 1932 年报道这辐射能把质子从含氢丰富的石蜡中轰出。他们认为其机制可能是某种康普顿效应。在英国海峡的另一边，在剑桥，查德威克的想法不一样。卢瑟福中子很活跃，查德威克认为它可以说明铍辐射。因此，他重复并修正了巴黎的实验，不久产生结论：所产生的是中子而不是 γ 射线。按照查德威克说法，这一过程是 ${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$ ，这里 n 代表质量为 1 的中子。在他的《中子可能存在》一文的注释中，查德威克讨论了被观察的效应可归结于“一个高能量子”而不是中子的可能性。“直到现在，”查德威克结论说，“所有的证据是偏向于中子，而量子假说仅当能量与动量在某处被放弃时才得以维持。”当用 α 粒子轰击



玻色子时，查德威克也发现了中子，并从这一过程推断中子的质量接近于 1.0067 质子质量。

既然中子已被发现，人们可能以为不再需要核中的电子了，原子核的一切都没问题了。但在 1932 年，事态远不是这样的。查德威克把他的中子理解为卢瑟福长期追逐的质子-电子复合体，并假设“质子与电子形成一个小偶极矩，或者，更诱人的图景是我们可以取一个质子嵌在一个电子之中。”至于中子可能是基本粒子，查德威克评论说：“[这观点]现阶段没有推荐的可能，除非可以说明诸如 N^{14} 的统计学。”（Beyer 1949, 15 and 19）在大多数时间，他和大多数其他物理学家犹豫地承认中子是基本的。第一个提出中子是自旋为 1/2 的人，是列宁格勒物理学家德米特里·伊万连科。1932 年夏，伊万连科强调这个提议解决了 $N-14$ 难题。然而，至少花了一年多的时间，绝大多数用惯了二粒子规范的物理学家才接受中子的基本本性。模糊的态度明显地展示于 1932 ~ 1933 年海森伯关于核结构的重要理论中。在其中，他引入质子与电子之间的交换力，用量子力学的方法处理原子核。尽管把质子与电子都视为核的基本成分，海森伯一开始就用了核电子概念，把中子当作质子-电子联合体。基本粒子仍是质子与电子。海森伯的核结构理论标志着核理论新篇章的开始——或者宁可说，如此领域的开始——它很快涌现出由尤金·维格纳、埃托尔·马约拉纳和其他人的重要贡献。

在 1933 年关于“原子核的结构与性质”的索尔维大会上，中子是中心议题。狄拉克提议核由三种粒子组成：质子、中子和电子。在当时，这提议并不特别奇怪。查德威克仍然在复合观点与基本观点之间摇摆。不论正确观点是什么，中子是一个有用的粒子，因为如查德威克对索尔维的与会者所说明的，它可用作核过程中的一颗弹丸。例如，他报道他观察到在跟氧的反应中从中子中产生出 α 粒子来，反应式是 ${}^1_0n + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$ 。使物理学家

相信中子的基本本性的说服力，部分是来自核理论范围内的各种新发展，部分是中子质量的更精确测量。查德威克原先得到的中子质量是 1.0067 质子质量——这就是，略小于一个质子加一个电子的质量（1.0078）。继后的实验似乎证实它要求一份能量把中子分裂成它的组成粒子，从而该粒子是个束缚的质子-电子系统。可是，新的、更精确的测量表明：中子质量稍大于质子-电子系统。1934 年，当物理学家在伦敦召集一个关于核与宇宙射线的学术会议时，这被认为是一个确立了的事实。当时认识到，中子是不稳定的，必定自发地衰变为一个质子和一个电子。这首先是被查德威克和毛里斯·哥尔德哈伯于 1935 年提出的。从那天起，复合中子便不再被讨论，电子也最终从核中被排除了。可是花了一段时间，中子衰变才实际被观察到。它这需求助于核反应堆中的强中子源。1948 年 A·H·斯内尔和他在欧克里得基的合作者第一次报道获得了强中子源。两年后，加拿大查尔克瑞瓦反应堆的 J·M·罗布逊确定中子寿命约为 13 分钟。

在通常称为核物理与粒子物理奇迹迭出的 1932 年中，中子或许是最引人注目的角色，但称之为奇迹迭出的 1931~1933 年更为合适些。中子不是唯一的角色，也不是第一个角色。1931 年 12 月末，哈罗尔德·乌瑞，一位哥伦比亚大学的化学家，1923~1924 年在哥本哈根跟玻尔相处过，报道氘的发现。跟合作者费尔迪德纳·布里克维迪和乔治·默菲一道，乌瑞通过蒸发 4 升液氢把氢的重同位素提炼出来。他们用较重核所产生的波长略微变化的频谱确认了这种同位素。随后 1933 年备制的重水是由另一位美国化学家吉尔伯特·列维斯首先做出的。有一段时间，这些粒子使用着各种混乱的名称——如双质子、氘子、氘核，不一而足——但乌瑞的“氘子”及相应的氘原子，最终胜出。然而，30 年代早期还有另一个重要的发展，那就是 1934 年初由约里奥特-居里夫妇用 α 粒子照射铝时发现了人工放射性。这两位法国



科学家探测到新近发现的正子的产生。他们首先提出正子是被发射的质子的衰变产物，即 $p \rightarrow n + e^+$ 。可是，他们很快就认识到：正子的活性是在 α 源撤走之后才发生的，从而他们实际是发现了正 β 放射性： ${}^4\text{He} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{30}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ ，接着是 ${}^{30}\text{P} \rightarrow {}^{30}\text{Si} + e^+$ 。发现人工放射性的重要性立即被承认，1935 年诺贝尔化学奖授予约里奥-居里夫妇。这一新的发现立即在核物理学、化学、生物学和医学中被广泛地采用。

1932 ~ 1933 年真正是激动人心的岁月，不仅回头看如此，而且，在当时物理学家经历着的也如此认为。1932 年 3 月，玻尔致信卢瑟福，“在核构成领域中此间进展是如此神速，致使人们不知邮差下次会带来什么消息。……人们看到一条康庄大道已经开通，不久就应该能够预言，在给定条件下任何核的行为了。”（Weiner 1972, 41）两年半以后，弗朗克·斯佩丁，一位美国物理学家，在一封致伦敦会议的信中报道：“还有一个关于核物理学的专题讨论会。这领域发展如此迅速，以致人们一想它就觉得眼花缭乱。一谈到 H、He、新的人工放射性元素、中子与正子的实验性质，以及中微子和负电质子的预言性质，那些一直执着于核的旧式质子与电子图像的人们觉得头都要炸了。”（Weiner 1972）

这些奇特新理论的发现，只是许多不可思议事情中的一部分。新的仪器不乏重要性。在 1930 年以前，使核反应发生的唯一方法，是利用自然碰巧提供的、 α 射线形式的弹丸；另一选择是，利用更难控制的宇宙射线，但这方法仍处于婴儿期。第一个成功的核分解是 1932 年春被开文迪什实验室的约翰·科克罗夫和恩斯特·沃尔顿利用纯人工方法产生的。两位物理学家使用电压倍增系统，这系统部分是由都市维克斯电器公司提供的。查德威克 1924 年转向物理学加入卢瑟福团队之前作为电器工程师学员在该公司工作过。利用电压倍增系统，1929 年他们获得的质子

能量达 380 千伏。3 年后，700 千伏。科克罗夫和沃尔顿用高能质子轰击锂进行研究，使用闪烁计数器和云室摄影两种方法作探测器，得出结论：“质量为 7 的锂同位素捕获 1 个质子，质量为 8 的生成核分裂成两个 α 粒子。”（Beyer 1949, 30）此外，他们注意到：这过程发生的能量与速率跟伽莫夫的量子力学计算定量一致。事实上，科克罗夫的高强度仪器的设计用到了这些计算。科克罗夫知道伽莫夫理论，认识到能量达 300 千伏的质子是轰击玻色子与锂靶相当有效的弹丸。

约在科克罗夫和沃尔顿进行其开拓性实验工作的同时，美国还在建造着其他类型的加速器。1931 年，美国工程师罗伯特·范德格拉夫构造了一个最大电压为 1.5 百万伏的静电加速器。同年，恩斯特·劳伦斯和他的学生戴维·斯龙在贝克利的加利福尼亚大学建造了第一个实际的直线加速器，他们用它获得最大能量为 1.3 百万伏的汞离子。可是，使核物理学革命化并引进“大科学”纪元的是劳伦斯的另一台机器。第一个实验回旋加速器，使用强磁场使核粒子半径随速率的增加而增大，建成于 1931 年。1932 年的改型使用直径为 11 英寸的磁极面，产生 1.2 百万伏质子电流 10^{-9} 安。劳伦斯和他的合作者 M·斯坦利·利文斯顿有信心预言“在不远的将来”会产生 1 千万伏的质子束。原先的机器都未取名，但劳伦斯和他的团队使用“回旋加速器”作为他们实验室的俚语。到 1936 年，回旋加速器在核物理学的广大领域中成为通用名，从纯核反应研究到工业与医学的应用，证明它是特别有用的。它是一项地道的美国技术。在 20 年代，只有劳伦斯掌握了它，回旋加速器操作员由他培训。到 1934 年，美国开始生产该机器。首先由利文斯顿为康纳尔大学生产一台小的回旋加速器；5 年后，有十多台在运转或建造中。在美国之外，第一台回旋加速器于 1935 年在东京里肯（物理化学研究所）安装，1937 年开始运行。在欧洲，是在同一时期引进的。但比美国稍



迟。引进迟缓的一个原因是经费问题，和思想保守以及对新技术不熟悉也有关系。1939 年中期，欧洲有 5 台回旋加速器在剑桥、利物浦、巴黎、斯德哥尔摩和哥本哈根运作。

一般的实验核物理学和具体的加速器物理学，有助于改变物理学的地域分布。令人瞩目的是：强大的德国物理学共同体不再以领导者身份跻身于发展之中。相反，它在这方面的发展不仅落在美国、英国之后，而且，还落在法国之后。要知道：甚至在纳粹政权改变德国物理学条件之前，当时德国物理学家在物理学许多其他领域仍居领导地位的，但是事态就这样发生了。

自约 1910 年起，法国就没有能力保持世界物理学领导者之一的较前沿地位了。跟其他几个大国所发生的情况相比较，法国物理学家没有多少可吹嘘的。例如，法国期刊不再属于领导期刊之列。1934 年被引用最多的法国期刊《报道》，在所有物理期刊中排名第 7（《物理杂志》排名第 1）；《物理期刊》排名第 11，而《物理学纪事》在名单中仅排 34 位。作为法国物理学家声誉低下的另一个指标是，美国物理期刊中所有参考文献的 27% 是德国的论文，只有 3% 是法国的论文。可是，核物理学的崛起是一个因素，它有助于使法国恢复 30 年代末的元气，使巴黎复苏为世界物理中心的一座城市。约里奥-居里的实验室成为了核物理学的领导中心——吸引着许多外国物理学家。

尽管英国与法国做出了重要的工作，核物理学却是在美国经历着它的旺盛的成长期。1935 年，美国的《物理评论》中核物理学占的份额是 8%；1932 年增至 18%，1935 年增至 22%，1937 年不低于 32%。核物理学不仅在增长，而且，投入也在增长。为了在核研究中的领先，外界的资金是必要的。例如，1935 年的《物理评论》中，受到赞助的论文总数的 46% 是核物理学方面的；1939 年，《物理评论》在核方面的论文有 1/3 受到外界赞助。

第十三章 | 从二粒子到多粒子

反粒子

1930年8月在布里斯托的英国科学进展协会的会议上，狄拉克作了一个报告。他说：“所有物质均由一种粒子构成一直是哲学家们追逐的梦，所以在我们的理论中有两种粒子，电子与正子，是不太令他们满意的。”（Kragh 1990, 97）当时，狄拉克相信，在哲学家失败的地方他成功了。他已把所有物质分解并证明是电子的种种表现。（读者会承认，J·J·汤姆孙原子论与一般的电动力学世界观的简单性，是含糊的。）狄拉克深深地被一元论物质观迷住了。然而，讽刺地是，在布里斯托会议之后不到一年的时间里，他的一元论除电子之外又引入了4个新的基本粒子。利用狄拉克1931年的理论和泡利的中微子假说，第一个突破是用二粒子规范做出的。

显而易见，1928年的相对论电子论导致狄拉克和他的几个同事产生许多奇怪的推论。有时称为“ $\pm$ 困难”的问题在狄拉克方程中是有其根基的，它形式上包含负能解。跟经典物理情形不同，这些负能解不能当作非物理而剔除掉，而必须认真对待——就是说，它们多少相关于自然中某些东西。1929年狄拉克相信，



他已经找到问题的解决办法。“避免电子具有负动能有个简单的办法，”他致信玻尔说，“如果所有负能态均被占满，很少正能态却被占据，那么，这些正能态电子就不能跃迁到负能态上去，从而行为就很正常。……似乎有理由假设，不是所有负能态均被占据，而是存在一些‘空穴’……人们不难看到这样的空穴会在电磁场中运动，假如它具有一个正电荷，我把这些空穴称为质子。”（Kragh 1990, 91）

狄拉克的质子如同电子理论，发表于1930年，假定了一个其负能态被无穷个遵从泡利排斥原理的电子占据的世界。只有个别未占据的态——‘空穴’，会作为被观察到的实体出现。但它们为什么以2000倍于电子重量的质子面貌出现呢？狄拉克讲了两个理由：一是，如果质子与电子是仅有的基本粒子——几乎当时所有的物理学家都相信——那就别无选择了；二是，这假说是被长久追逐的、对狄拉克具有高度诱惑力的“哲学家之梦”。

诱惑也罢不诱惑也罢，这假说遭遇普遍的怀疑，并立即招致许多严重问题。例如，如果质子是电子的反粒子（这名字尚未引入），假定它会按方式 $p^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ 湮没。计算表明：在这情形中，物质的平均寿命会突然降至约 10^{-9} 秒。单凭这一论据还不足以使狄拉克信服他的理论是错的。但在1931年春他（和其他人）认识到：空穴必须具有跟电子一样的质量。在新的版本中，如出现在《皇家学会的进展》中一篇注目的论文中那样，反电子第一次被叙述为是“一种实验物理学未知的、具有跟电子一样质量和相反电荷的粒子”。（Kragh 1990, 103）此外，由于质子现在是一个不同种类的粒子，所以，按照狄拉克理论，它或许有它自己的反粒子。几年之后，在他的诺贝尔演说中，狄拉克进一步猜测完全由反粒子组成的物质：“地球（以及推测整个太阳系）由占优势的负电子和正质子组成，我们必须宁可把这视为一种偶然。很可能对于某些恒星，情况可能是另外一个样。那些恒星很可能主

要是正子与负质子组成。其实，两类恒星可能是一半对一半。由于两类恒星具有准确相同的谱，所以，用现在的天文方法是无法把它们区别开来的。”可是在1931年，反电子作为一个纯假想的粒子，大多数物理学家拒绝认真对待它。只是在后来，它终于被认为是“或许我们世纪物理学中所有大跳跃中最大的跳跃”，1973年海森伯如此慷慨地称赞它。

狄拉克1931年的论文原本不是处理反电子的，而是一个大胆的、失败了的尝试，试图说明一个小电荷的存在。在这一工作的过程中，狄拉克在波函数中引入一个非整数的相因子；他证明：这等价于引入一个以磁荷为其源的磁场——那就是说，一个磁单极子作为电子的磁类比物。狄拉克的单极子是一个假想的粒子，仅在不为量子力学所禁戒的意义上合理，狄拉克认识到这并不能确保自然中实际存在着单极子，但由于没有理论上的理由否定单极子的存在，于是，“人们会惊讶是否自然没有用上它〔可能性〕。”在观念的历史上，这一论据——能够存在的客体必定存在——追溯到莱布尼兹，它被称为充足律原理。跟正子相反，磁单极子在物理学中没有引起关注。他们不理睬虚拟中的粒子。可是，关于中子可能是由两个相反电荷的磁单极子组成，或者单极子可能在原子核中起另一种作用，存在一些猜测。只在20世纪70年代，单极子理论以及寻觅这粒子的实验才成为一个研究领域。从那时起，曾有几处宣称探测到了磁单极子，但没有一个被确认。单极子可能存在，或者它们可能曾经存在，但迟至90年代磁单极子的面貌仍然跟1931年一样：它是假想的（也可参阅第二十一章）。

但是，反电子的理论在1932~1933年间改变了。在加利福尼亚理工学院，卡尔·安德逊，密立根原先的学生，在宇宙射线的云室照片中注意到原以为是质子的痕迹。在1933年3月的一篇后来的论文中，他提示他发现了一个正电荷的电子，或如他所说的



一个“正子”。他也提议称正常的电子为“负子”，但这名字虽偶尔使用，却不被看好。安德逊探测到的正子也许有人认为是一个被理论激励而发现的例子，但实际上，这项发现实际上一点也不相关于狄拉克理论。并不把正电子解释为狄拉克的粒子对的产物，安德逊相信它是从一个被入射的宇宙射线光子炸开的原子核中弹出来的。他的权宜性解释既未涉及狄拉克，也未涉及量子力学。这解释具有一种旧式风格，信赖一种跟密立根的观念一致的、关于核的可见概念，而跟当时由海森伯和其他人建立起来的、复杂的量子模型几乎没有关系。安德逊写道：“如果我们保持核由质子与中子（以及 α 粒子）组成，中子代表一个封闭的质子与电子组合体，那么，从电磁理论来看，关于质量的起源，最简单的假设似乎应该是，入射的原始射线跟质子的遭遇可能以这样的方式发生：质子张开的直径跟负子所具有的值一样。”（Beyer 1949, 4）

只是在布莱克特和意大利物理学家古瑟佩·奥克希阿里尼报道新的宇宙射线实验之后，特别在参照狄拉克理论之后，才认识到安德逊原先所发现的实际上就是狄拉克粒子。在一年之内，正子被普遍接受，在理论与实验上都被认为是重要的粒子。可是，正子被正面接受并不意味着狄拉克的空穴理论同样被正面接受，它继续受到批评。迟至1934年，密立根与安德逊坚持：宇宙射线正子先前就存在，或是在原子核中形成的，因而不等同于反电子。有些理论家，包括泡利，提议正子可能满足玻色-爱因斯坦统计，中微子被认为或许是一种核粒子，是由正子-电子对构成的。鉴于正子——别名反电子——是30年代中期被接受的，其他反粒子的假说平和地存在着。负质子偶尔被讨论，但不必是质子的反粒子。例如，伽莫夫在1934~1937年的几篇论文中，提议原子核包括有别于狄拉克的反质子的负质子。至于反中子，它是1935年被意大利（后来在巴西）物理学家格列布·瓦塔格因首次

引入的。

来自宇宙射线的惊奇

在狄拉克提出其空穴理论时，宇宙射线仍被视为自然中最神奇的领域。有些宇宙射线粒子具有很大的能量——比新加速器能提供的能量大得多，为此缘故，辐射对于核物理学与粒子物理学是利害攸关的。宇宙射线物理学高度相关于物理学的基本理论，它同时以其气球飞行与高山攀登的气派，具有自然探险的某种魅力。如美国物理学家卡尔·达罗 1932 年所写的，新世界是“在现代物理学因现象的细微性、观察的精确性、观察者的远行冒险性、分析的微妙性以及推断的庄重性而独一无二的”。正子的发现在极大程度上把宇宙射线研究置于物理学的一个中心领域。仅从《物理评论》发表有关这一主题的论文（包括通讯）数，就可以看到这一点。1928 年出现 2 篇论宇宙射线的论文，而 1929 年仅为 1 篇，1930 年上升到 4 篇，1931 年升到 9 篇，下一年即 1932 年跃到 30 篇，1933 年不少于 43 篇论宇宙射线或正子的论文。

宇宙射线以“穷人的实验室”而著称，因为自然中自由释放粒子的能量是实际实验室中所未听说过的。当然，缺点是弹丸是完全失控的，许多方面甚至是未知的。跟加速器相比，“穷人”是就代价与组织而言的。30 年代的宇宙射线研究跟 20 年代开文迪什的经典低成本实验相差无几。卢瑟福未曾反对宇宙射线研究。1931 年杰贝兹·斯特里特，一位美国宇宙射线研究的领头物理学家和后来 μ 粒子的共同发现者，向他在哈佛的主任铁多尔·里曼申请一项年研究经费 800 美元的费用。整个申请是一页手写的报告，说明“康普顿与密立根所得结果不同，明显地表明：需要累积关于宇宙射线的资料”。（Galison 1987, 78）斯特里特得到了他的 800 美元，并聪明地花完了它。



为了理解宇宙射线探测器中所发生的事，不论搭乘气球或者置身于高高的山峰，物理学家需要知道宇宙射线本身的本性。密立根跟他的学生一道仍然辩护他的“出生的哭叫”理论，按照这理论，原始宇宙射线是高能光子。这意味着，由于在地磁场中偏转，不应该有地域效应，没有东、西方的变化。而事实上，密立根跟他的合作者根本没有发现这种效应的证据。相反，在东海岸的美国物理学家，特别是康普顿，认为存在毋庸置疑的地域效应的证据，因而原始的宇宙射线必定是由带电粒子所组成的。意见的分歧演变成一场大争论，覆盖着美国报纸的版面。总的来说，争论的结局是：密立根输，康普顿赢。早在1929年，沃尔特·博特和维尔纳·科尔赫斯特在柏林宣称：他们确认宇宙射线含有穿透力的荷电粒子，而不是在此之前以为的“超 γ 射线”。他们的结论被年轻的意大利物理学家、佛罗伦萨大学的布鲁诺·罗西所证实。他发展了一个重要的新技术，将盖格-缪勒计数器连接到一个“符合电路”，使那些通过全部计数器的粒子才被记录。约1933年，实验证明，特别在不同纬度的实质性测量数据否定密立根的光子理论。大多数有穿透力的原始辐射粒子证明是带电的，而且，不知什么原因是带正电的。有一个时期，密立根、安德逊和其他的人拒绝这个结论，但约从1935年起，争论结束了。英国实验者利用符合电路装备被计数器控制的云室，证实了博特、科尔赫斯特和罗西的结论。1935年斯特里特显示从铅版出射的大多数事件是个体的，因而是具有穿透力的带电粒子，而不是源于光子的阵雨或瀑布式粒子。这多少终止了争论，但它激起了一个命名的问题：这粒子是什么呢？

当初这些穿透的宇宙射线粒子被认为是电子，但它们丧失能量的方式表明它们可能不是原先的粒子。它们的行为怪异，安德逊和他在加利福尼亚的团队正式指认它们是“绿”电子，以区别于正常的、可吸收的“红”电子。1936年这些“绿”电子的本

性成为讨论的焦点，因为对于问题的解答需要从理论上去寻找，就是说，现行量子电动力学可能不能说明这一现象。似乎有两个选项：一是在高能范围内量子理论失效；二是一种新的、质量介于质子与电子之间的粒子在运作。几乎所有的物理学家选了第一项，但谜底的答案却是第二项。

这粒子是质子吗？按照安德逊和瑟斯·路德梅耶的意见，不是。他们在1934年伦敦会议上作结论说：“在海平面上的最高能量的宇宙射线具有电子的质量。”（Galison 1983, 287）如果这些具有电子质量的粒子不是电子，那它们是什么呢？1936年12月12日安德森为他发现正子而接受诺贝尔奖。这本是猜测神秘的绿电子的一次机会，但安德逊抵制了猜测的诱惑。他在斯德哥尔摩的讲演中提到了新的宇宙射线资料，并认为“这些具有高穿透力的粒子虽然不是正、负电子，将会为未来的研究提供有趣的材料”。的确如此，1937年春，安德逊与路德梅耶达到结论：最合理的假说是“存在单位电荷的粒子，其质量（可能没有一个唯一的值）大于正常电子的质量，远小于质子的质量”。（Galison 1983, 298）随后不久，在北美大陆的另一边，斯特里特和他的团队根据不同的论据达到一个类似的结论。同样，在日本仁科方雄和他的团队也做出了相同结论。因此，今日称之的 μ 子是一个三重发现，发现的优先权无争执：它属于加利福尼亚人。一个质量介于电子与质子之间的粒子—— μ 子，被发现了。那么重电子、介子或 μ 子准确地说是何时发现的呢？这几乎不是一个值得思考的问题。如果硬要思考的话，那就太复杂了。无论如何，它跟相同时期宇宙射线和粒子物理学所发生的其他发展有错综复杂的关系。

在安德逊-路德梅耶-斯特里特粒子被承认是真实粒子之后，下一个问题显然是确定它的质量及其他特征，诸如它的自旋和衰变方式。较次要的问题也得解决，那就是要确定粒子的名字。拟



议中的名字有介子、重电子和汤子。第一个名字出自其质量；最后一个名字出自汤川新近的“重量子”理论。40年代由霍米·巴布哈提议的简易名“介子”变成了一个大众化的名字，1947年被巴黎国际联合会宇宙射线委员会正式认可。根据特殊电离与云室痕迹长度，爱德华·C·斯蒂文逊估计 μ 子的质量约为130电子质量。跟汤川的核力理论的估值200电子质量相差不远。汤川粒子与1937年介子的同一性是由奥本海默与罗伯特·塞尔伯在同一年首先提出来的。我们将会看到，那是一场小灾难。汤川的预言发表在介子发现之前，而物理学家相信这预言是关于介子的。这个事实意味着，实验发现与介子理论之间存在因果联系。在正子情形中，理论与实验之间不存在联系。安德逊与路德梅耶在1937年以前并不知道汤川的预言。如路德梅耶后来所回忆的，“ μ 子，跟正子一样，是一个纯实验发现，就是说，它的被发现完全独立于关于什么粒子该存在或不该存在的任何理论思考。”（Brown 1981, 132）介子更精确的质量值的确定必须等到第二次世界大战结束。到1950年，介子质量一直被确定为 215 ± 6 电子质量，清楚地显示不同于当时发布的汤川粒子的质量。关于衰变，介子与汤川粒子的同一性表明衰变方式是 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu$ 或 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$ ，与 β 衰变类似。在30年代，关于最终被称作 μ 子的知识甚少。一直到1940年由罗马大学的弗朗科·拉瑟蒂（他同时在加拿大工作）确定平均寿命为 $(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-6}$ 秒，跟通行接受的值很不相同。当时没有办法确定介子的自旋。一般说来，虽然介子的发现有助于理解宇宙射线的量子电动力学的内容，它实际上并没澄清基本粒子物理学的混乱局面（表13.1）。事实上，虽然这点进展在当时算是聊胜于无，介子的发现却使局面变得甚至更为复杂。

表 13.1 某些粒子的发现, 1897 ~ 1956

通用名	曾用名	预 言	发 现
电子	微粒子, 负子	1894, J · 拉摩	1897; J · J · 汤姆孙
质子	H-粒子	—	约 1913 (无发现者)
中微子	中微子	1929, W · 泡利	1956; F · 瑞尼斯, C · 科万
正子	正电子	1931, P · 狄拉克	1932; C · 安德森
中子	—	1920, E · 卢瑟福	1932; J · 查德威克
反质子	负质子	1931, P · 狄拉克	1955; O · 钱伯莱因, E · 瑟格瑞, C · 维岗德, T · 乌普斯朗迪斯
反中子	—	1935, G · 瓦塔 格因	1956; B · 科克, G · 朗 姆伯森, O · 皮斯昂尼, W · 温泽尔
μ 子	介子, μ^- -介子	—	1937; C · 安德森, S · 路德梅耶
π 子, 荷电	π^- -介子	1935, H · 汤川	1947; C · 鲍威尔, G · 奥克希阿里尼, C · 拉 铁斯
π 子, 中性	π^0 -介子	1938, N · 克默	1950; R · 布约克朗德, W · 克朗多, B · 莫耶, H · 约克
Λ^0 重子	ν^- -粒子	—	1947; C · 布特勒, G · 罗彻斯特
$K\pi_3$ 重子	τ^- -介子	—	1949; C · 鲍威尔与其他



量子理论中的危机

电磁场的量子理论首先是由狄拉克以及 1927 年被约丹发展的。约丹称它不久“很可能”发展成为“量子理论的电子论的自然表述，在其中光和物质都被描述为三维空间中相互作用的波”。(Rueger 1992, 312) 可是，这发展却受到比预期的大得多的挫折。两年后，泡利与海森伯提出量子电动力学的宏观理论 (QED)。它是相对论不变的，包含辐射与物质波的量子化。海森伯-泡利理论是数学物理的杰作和后来 QED 的基础，但它也是复杂的，大多数物理学家理解不了。尽管它的前景看好，它仍然受到悖论与发散的侵扰。特别是电子自能（一个电子在自身电磁场中的能量）证明是无穷大，这当然是一个不可接受的结果。然而，海森伯-泡利程式的许多应用跟理论的缺陷无关。

1925 ~ 1927 年，非相对论量子力学经历着成功与急速发展。在这之后，对于量子力学的基本问题进行了一段时间的严峻质疑，就着手试图建立关于电磁相互作用的、相对论不变的理论。许多物理学家认为一场基于某种全新概念的量子革命即将来临。所要解决的问题，部分涉及逻辑与概念的本性，部分植根于现有理论不能说明新的经验事实。在第一类问题中，原型案例就是点电子的自能，它证明是无穷大。这只是基于 1927 年海森伯-泡里理论的量子电动力学所面临几个问题其中的一个。鉴于无穷大自能在经典理论中有其对应物，非经典本性的新发散会在相对论量子理论中呈现出来。例如，J·罗伯特·奥本海默 1930 年证明：除了经典自能外，一个新的量子效应会对自能贡献一个二次发散项。如奥本海默指出的，新发散会引起谱线的无限位移。当正子并入量子理论之中时，无穷大仍然存在。在正子理论中，真空极

化对电荷密度的贡献证明为无穷大。还有另一种发散，那就是，30年代考虑荷电粒子散射中软电子发射时出现的“红外灾难”。联系到电磁量子场的合法性时，相对论量子理论的逻辑一致性也被质疑。1931年，朗道与佩尔斯主张：场的测量不能含糊地进行，因此，现代的量子电动力学是不一致的。朗道与佩尔斯的批评一直没有引起关注，直到1933年玻尔和里昂·罗森费尔德证明量子电动力学的推论是跟电磁场量的最可能好的测量相一致的。玻尔-罗森费尔德的工作广泛地被解释为：仅对那些关于所论及的非点时空域的平均场量提出问题时，QED才会免于失败。

对物理学家来说，QED的理论与概念状态是诸多麻烦之源。1930年，玻尔致信狄拉克说：“我……坚定地相信如果不比现有量子力学所思考的更深入地修正我们通用的物理观念，现有的麻烦是不能解决的。”（Cassidy 1981, 9）几年之后，问题甚至变得更加尖锐了。罗伯特·奥本海默致信他兄弟弗朗克总结说：“如你所清楚地知道的，理论物理——中微子闹鬼，哥本哈根不顾一切证据坚持宇宙射线是光子，玻恩绝对不可量子化的场论，正子的各种发散，以及进行严格计算的不可能——处于走向地狱之路。”（Kragh 1990, 165）1936年，狄拉克达到结论：QED必须被抛弃，因为它是一个丑陋的、复杂的理论，实际上不能说明任何问题。爱因斯坦发现QED是“可怕的”，欣然同意狄拉克的结论。

在第二类问题中，实验反常，即从理解原子核和宇宙射线的高能部分所激起的挑战，是最严重的。1933年，瓦尔特·海特勒，量子场论专家，得出结论：物质的制动快速荷电粒子的理论与实验不一致。当时他参加贝特发展的一个更严格的制动理论，不一致性依旧。“对于高入射能，理论上的辐射能量损失太巨大了，无论如何不能跟安德逊的〔宇宙射线〕实验相协调，”贝特与海特勒写道：“有趣的是快速电子的能量损失……提供了第一



个例子，说明量子力学对于一种核外现象明显失效了。”（Galison 1983, 285）安德逊与路德梅耶在 1934 年 10 月伦敦会议上提供的资料表明：对于低能，跟理论很好地一致；但对于大于 150 倍静电子质量（ $mc^2 = 0.51\text{MeV}$ ）的能量，跟理论全都不一致。为了说明理论与实验的分歧，有人提议穿透粒子是质子而不是电子；而当这假说证明是站不住脚时，结论就是，QED 在高能区域失效。按照贝特给伦敦会议的报告，“关于宇宙射线电子穿过铅板的安德逊-路德梅耶实验……[表明] 对于约 10^8 伏的能量，量子理论明显错了。”（Galison 1983, 288）贝特、海特勒、奥本海默和其他量子理论家在引入一种新粒子与承认 QED 失败之间面临一种选择。在这过程中，他们选择了第二项。1933 年介子的发现，大大缓和了紧张局势。许多物理学家得出根本不需要一次量子革命的结论。但危机依然存在，因为 QED 仍受无穷大的困扰。30 年代涌出的新介子理论有其自身的发散问题。

对于接连不断的危机的回应形形色色。许多杰出的物理学家，包括玻尔、狄拉克、海森伯、泡利和朗道，相信革命性的进路，即在现有理论内不可能解决问题，而应该利用这些问题来构建一种未来的理论，它可能不同于现有的量子理论，正如它不同于经典理论一样。其他的人，更注重实际的物理学家（贝特、海特勒、费米和奥本海默）认为可以通过技术上的可能改进来回避问题，或者，对现有理论作某种合适的重新表述，至少可以导致将问题转向经验的合理回答。虽然这两种态度就是两种历史趋势，“革命派”与“保守派”的区分不是绝对的，也不是永久的。例如，虽然海森伯与狄拉克一般偏向于革命观，即现有理论必须被一个全新的理论所取代，这并不妨碍他们基于修改现有理论来探索问题的出路。

30 年代物理学家对量子力学问题的态度可大致分为四类：

1. 有些有革命意向的物理学家甚为欢迎系列危机。他们将之

视为现有理论局限性的真实表现，这些是梦寐以求的未来理论的有关线索。海森伯认为无穷大不应该被剔除，并且，他相信在适当解释版本中，它们也会出现于未来的正确理论中。

2. 另一些物理学家偏爱回避各种发散，却不改变现有理论的构架。方法之一是切断高频影响。切割处理经常被使用，而且在许多实际计算中证明是有帮助的。但由于缺乏理论的合理性，又破坏了相对论不变性，它们广泛地被认为是实用的赝解决办法。从一个推测为不可靠的理论抽出可信赖的信息的另一种方法，利用适当的技术删去不需要的东西。这一进路由狄拉克与克拉默斯开拓，它孕育有 1945 年以后发展起来的重整化程序的萌芽。我们将在第二十二章回到这一主题上来。

3. 相关于这条进路是试图直接从量子力学，或通过改变经典的基础，来消除各种发散项。其中第一条进路是格雷戈·温泽尔在其所谓 λ -极限方法（1933 年）和狄拉克在其引入几率和希尔伯特空间中的不定度规（1941 年）中采取的。

4. 最后一个进路是放弃量子电动力学，至少暂时利用一个基于对称性论据的较中庸的理论或规则集来替换它。有一段时期，这一选择被克里斯蒂安·莫勒、奥本海默和贝特采用。但被认为不如量子电动力学基本。

海森伯是对 QED 的基础讨论，在其纯理论脉络中以及考虑其在宇宙射线现象的应用两方面，做出最积极贡献的人之一。他解决发散问题的偏爱方法是引入一个最小长度，如他在 1938 年所做的。当时他主张最小的或基本的长度应该从汤川的新介子论中推导出来。海森伯希望在这基础上建构一个新的、相对论不变的量子理论，它以极限情形包容旧的理论，仅当基本长度不可视为无穷小时才跟它相区别。可是，他的理论受到大多数物理学家的批评，其中包括泡利，开始时他是在海森伯研究纲领中跟其合作的。



汤川的重量子

“在量子理论的现阶段，关于基本粒子相互作用的本性知道得甚微。”这是汤川秀树，一位来自大坂帝国大学的28岁的物理学家的一篇发表在《日本物理学学会进展》1935年第一期上的文章的开头语。这杂志在日本国外鲜为人知。文章的原本是1934年11月17日在东京物理数学学会的会议上的10分钟发言稿。汤川关注核力问题，一方面受到海森伯1932年的核理论、另一方面受到费米1934年的 β 放射性理论的激励。源于这两个理论的思想的推理，他探觅发展一种后来称之为弱、强相互作用的统一图像。在此努力中，他假设“一类新的量子”，它媒介核中的交换力，类似于电磁场中的光子所起的作用。汤川提示新的核势随距离急速减小，势程约为 $\lambda = 2 \times 10^{-15}$ 米，这是核的特征半径。他进一步假设这个程参数跟荷电“U-量子”的质量的关系是 $\lambda = 2\pi mc/h$ ，因此，预言它的质量值约为200电子质量。

但是，这重量子真的存在吗？或者，它只是人类的数学游戏的产物呢？汤川谨慎地提及“如此这般具有大质量、带正或负电荷的量子绝不会因在内室而不被实验发现，以上理论似乎是在一条错误的思路”。（Beyer 1949, 144）然而，毋庸置疑的是：汤川深信他的量子存在，不像他的西方同事那样，惧怕引入新的粒子。

汤川的媒介电子与质子的新基本粒子的预言，没有引起注意。不仅在欧洲和美国，即使在日本，它不被关注也达两年之久。甚至汤川本人的研究游离这个主题之外也有一年多。只是当安德逊与路德梅耶的反常测量开始吸引人们注意的时候，汤川才于1937年1月18日给西方期刊发了个关于他的理论的注释。提出“被安德逊与路德梅耶发现的反常痕迹不是完全不可能的，那

很可能属于其 e/m 比光子大的未知射线，实际上归因于这种 $[U^-]$ 量子。”（Brown and Rechenberg 1996, 123）因该提议被判为猜测，《自然》的主编拒绝发表这个注释。（4年前，这个杂志也拒绝了费米关于 β 衰变的论文。）可是，鉴于1937年3月宣告介子已经在宇宙射线中被发现了，对于汤川理论的反应戏剧性地改变了。它在西方期刊第一次被提到是在1937年6月奥本海默与塞尔伯的文章中，他们判断汤川理论是人造的与不正确的。然而，一个负面的反应有时比一个正面的反应更好。奥本海默与塞尔伯的批评性评价无疑为这个日本理论起了广告作用。1937年秋，欧洲和美国物理学家忙于研究不知名的日本物理学家的论文。态度从冷漠到热情的突然变化的原因显然是，物理学家们在汤川预言中发现了那个最近被安德逊与路德梅耶在实验中发现的粒子。换言之， μ 介子就是 U^- 量子。这同一性被普遍地认定，但不久证明它是有问题的。在1937年以后的几年里，核力的介子理论吸引了大量的关注，特别在日本和欧洲。最重要的日本贡献者有：汤川、友永、阪田和武富。在欧洲包括海特勒、尼克拉斯·克默、赫尔伯特·弗勒利什、泡利和霍米·巴布哈（来自印度但在英国工作）。

核介子是不稳定的，1938年汤川估计其平均寿命是 10^{-7} 秒。同年，海森伯与汉斯·欧勒从实验数据分析发现为 2.7×10^{-6} 秒。跟战时的第一批直接测量相比，数字改变不多。海森伯与欧勒不担心数字不一样，发现一致就“很满意”。介子质量从未使物理学家举旗认输。30年代末期的实验未能给出介子质量一个确定值。相反，数值相差相当大，从120电子质量到350电子质量，或更大。然而，物理学家并未发现差异就是警告。有一段时期，物理学家设法使自己相信介子具有一个约为200电子质量的唯一值。试验又一次地显示，如果宇宙射线就是汤川重量子，那么，它就应该与核发生强作用。实验并未显示期待的高几率的物质捕



获，但这种反常也没有提醒物理学家怀疑单介子假设。

第二次世界大战的爆发自然意味着像介子理论和宇宙射线研究等纯物理工作被极大地削弱，但它并未完全停止。在几个交战国中，包括意大利、日本和美国，在整个战争期间，重要的工作仍继续进行。按照 1940 年友永和荒木提出的介子理论，负粒子应被核捕获与吸收，仅剩下正粒子衰变为电子与中微子。由于负介子（以后我将称之为粒子）被吸收的几率比衰变几率大得多，按照这理论，负介子将几乎全部被吸收，不会出现衰变电子。友永效应被三个意大利物理学家马瑟罗·康弗斯、奥瑞斯特·皮斯奥尼和埃托尼·潘西尼利用离子作吸收器于 1945 年证实。可是，在继后用石墨做实验时，该效应神秘地消失了；在其他的轻元素中，负介子证明跟正介子以差不多相同的速率衰变。这个 1947 年初得到的结果很快在美国被确认是一个真正的反常，因为它跟友永-荒木预言矛盾。在此期间，单介子理论虽困顿不前，却积聚了能量，它不再被忽视了，事态突然进展迅速。虽然意大利物理学家未对反常提出任何说明，他们在美国的同事却提供了。

在 1947 年第一次避难岛学术会议上（将在第二十二章作进一步讨论），意大利人的实验是讨论的主题。罗彻斯特大学的罗伯特·马沙克提议用二介子假说来解释反常。按照这假说，存在两种不同的介子，各具不同的质量和寿命。在高层大气中，弱作用介子出自于强作用粒子的衰变。不久后，他意识到了布里斯托有双介子论据，并认识到那很适合于他的思想。跟贝特一道，马沙克把这思想发展成一个合适的二介子理论，其中包括重介子半衰期的计算，约为 10^{-7} 秒。一个多少类似于贝特-马沙克理论的提议，在日本独立地，被阪田与井上根据阪田与谷川的甚至更早的思想提出来了。

对康弗斯-皮斯奥尼-潘西尼实验的另一个反应来自意大利物理学家布鲁诺·庞特科沃，他当时在加拿大工作（后移居前苏

联)。1947年夏，庞特科沃提示安德逊-路德梅耶介子是重电子，因此属于后来所称的轻子类。庞特科沃认识到介子被核捕获类似于电子被核捕获，其过程是： $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ ，类似于逆 β 过程： $e^- + p \rightarrow n + \nu$ 。稍后，关于电子与(μ)介子都是“弱”粒子的洞识，也被瑞典的奥斯卡·克莱因和意大利的吉奥范尼·普皮达到。

1947年春，汤川粒子与安德逊-路德梅耶粒子的长期认同迅速崩溃。庞特科沃回忆说：较早的保守氛围让位于“严正的反教条主义”。现在唯一的一个疑点就是识别强作用的汤川粒子。

第一次观察到介子将核分裂是1947年的事。当时，多纳尔德·佩金斯，一位伦敦物理学家，提议把一个宇宙射线事件认定为中等质量的“ Σ ”粒子跟一个轻核的作用。几周之后，塞西尔·鲍威尔与他在布里斯托大学的团队报道了在暴露于宇宙射线的感光底版上的其他类似痕迹。在他们1947年3月致《自然》的通讯中，布里斯托团队报道观察到“双介子”，就是说，看来是一个起源于另一个停止运动的介子。可是，仅在1947年秋，鲍威尔跟奥克希阿里尼和巴西物理学家瑟沙尔·拉特斯就得出结论：一个重的“ π -介子”衰变为一个较轻的“ μ -介子”（电子痕迹在1947年的乳胶中还不可见）。三位物理学家原先的结论是： $m_\pi/m_\mu = 2$ ，这意味着， π -至 μ -的衰变伴随着一个中性重粒子。仅当拉特斯回到贝克利并人工产生 π -介子时，质量才被精确测量，结果是： $m_\pi/m_\mu = 1.33$ ，跟布里斯托的值矛盾。因此，鲍威尔与他的团队被迫改口说：他们错了，衰变中并不涉及中性重粒子。反正都一样，重要的是： π -介子(π 子)已被发现，而且发现它不同于较轻的 μ -介子(μ 子)。

跟正子与 μ 子的发现同理论无关一样， π 子的发现也是如此。物理学家欢迎核力的真正介子，其质量跟汤川理论很吻合，似乎在物理理论中没有了安德逊-路德梅耶粒子的地盘。关于 μ



子，需要询问伊西多·拉比问过的话：“那是谁安排的？”1947年标志着基本粒子学科年轻的第一个阶段的结束，一个新阶段的开始。 π -介子被一位日本物理学家所预言，汤川理论主要被欧洲和日本的物理学家所发展；介子实验有一段时间是意大利的专业；1947年的发现是在英国由一个国际团队，包括一名意大利人和一名巴西人做出的；这项发现以及所有早期实验，被用来作为宇宙射线介子源。1947年以后，粒子物理学按许多方式发展着。这领域变成由美国物理学家主宰，宇宙射线的作用受到新的高能加速器的挑战。我们将在第二十一章续完未了的故事。

不确定性互补性

在紧随 1925 年的几年里，一小群物理学家不仅集中精力发展理论，并将之应用于各新领域，而且，集中精力理解理论的基础。在几种或明或暗的情形中，物理学家起着哲学家的作用。如我们所见，薛定谔原先企图用电动力学的理论解释波力学，但必须承认这解释是站不住脚的。其他物理学家提议不用电动力学而用流体力学作为合适的连续介质理论，在其上可以得到对于波力学一种半经典的理解。例如，1926 年，德国物理学家埃尔文·马德隆发展了一个流体力学模型，重现薛定谔理论的某些但远非全部基本特征。在第二次世界大战的前与后，不断地有人提出这类模型或类比，但它们不是很成功，大多数物理学家对之不太关注。从 1926 年秋起，玻恩的几率解释被大多数物理学家接受，虽然对于这解释的精确理解及其蕴涵大可讨论。德布洛意，他的工作是波力学的出发点，不甘心加入主流。1927 年，他提出“双解理论”作一个选项，它基于薛定谔方程的双解系统。按照德布洛意思路，一个粒子可被描述为对应于一个奇异解的、集中的能量包，而粒子被一个连续的、按玻恩几率观点解释的 Ψ -波函数



引导（导波）。这样，德布洛意得以表述一个微观物理学的一个决定论理论，而摈弃了玻恩关于整个量子过程的几率本性的洞识。德布洛意的理论在 1927 年索维尔大会上受到泡利的严厉批评，又得不到爱因斯坦和薛定谔的支持。由于失望和回答不了泡利的批评，德布洛意放弃了他的理论。到 1928 年，他已接受了玻恩、海森伯、玻尔和其他人喜欢的哥本哈根解释。在 20 多年里，他坚持做一名忠诚的哥本哈根派。

1952 年，德布洛意回归自己的双解理论的一个修正版本。从那时起他一直走自己的路。在同一年，一个类似的进路被年轻的美国物理学戴维·玻姆采用。在此之前，他以自己的观点效法着量子理论的正统道路。通过引入他称之的“量子势”，玻姆得以表述一种量子理论，虽非经典、但仍保留诸如按因果原理沿特定径迹运动的粒子等某些经典特征。玻姆理论因其不必要而受冷遇或批评，因为它只重现从通常量子理论得来的结果。海森伯视它是“意识形态的”，泡利把它视为“人为的形而上学”。大约过了 5 年，玻姆理论又变成广泛的议题，即使这时，它也只为少数物理学家所考虑。

在对战后作简短的迂回之后，我们现在回到黄金的 20 年代。正则共轭变量，如一个粒子的位置及其动量之间的不对易性的深层意义是什么？跟别的事情一样，这是海森伯在 1927 年春用他著名的不定性原理所回答的。（我们不加区别地使用‘不定性’和‘不确定性’两个词汇，虽然它们的意思有点不同。）有一段时间，这个原理的一般观念是悬而未定的。例如，在一封泡利 1926 年 10 月致海森伯的信中所讨论的，“第一个问题是：为何在任何情况下只可以是 p ，而不是 p 和 q 两者被描述为具有任意的精度？”（Hendry 1984a, 99）海森伯同意，并回答：“谈论具有确定速度的粒子的位置是没有意义的。但如果接受一个不精确的位置与速度，那确实有意义。”（Hendry 1984a, 111）同一主题进入

了狄拉克 1926 年 12 月的变换理论中。狄拉克的结论是：“人们不能回答量子力学中任何指明 q [位置] 和 p [动量] 两个数值的问题，……[如果] 人们用给定坐标与动量的数值来描述任意时刻系统的状态，那么，人们实际上不可能在这些坐标与动量初始值与它们随后某时刻之值之间建立起一一对应性。”（Kragh 1990, 42）海森伯跟狄拉克、约丹和泡利讨论甚多，收益匪浅，但从根本上说，他跟玻尔关于量子理论基础的讨论，才使他给出了不确定性原理的表述。当海森伯把他关于不定性论文的第一个版本给玻尔看时，这位丹麦物理学家并不喜欢它。“他向我指出第一个版本有些陈述的立论是不正确的。由于他总是坚持在每个细节上无情的清晰性，这些不足之处深深地触犯着他，”海森伯回忆道，“经过几周的讨论，无须强调，我们很快得出结论，多谢奥斯卡·克莱因的参与，我们实际的意见是一样的。不定性只是更一般的互补原理的一种特殊情况。”（Wheeler and Zurek 1983, 57）

海森伯论文的动机和他 1925 年论文的动机用的是同一论据。在那篇论文中，量子力学被第一次引入。他的出发点是哲学的：“如果人们想要弄清楚‘物体的位置’这个词汇的意思，比方说，一个电子的位置……那么，他就得描述确定的实验，借助于它可以测量电子的位置；否则，这个词汇是一点意义也没有的。”重要的是，海森伯并未把不确定关系陈述为一条哲学教条，而是从量子力学以及显示其意义的思想实验推导出来的。它是量子力学的推论，而不是理论的概念基础。海森伯证明：一个粒子位置的最小不确定性与粒子动量的不确定性之间存在关系式： $\Delta q \Delta p = h/4\pi$ 。他还证明：在测量某量子能量不确定性与时间测量中相应的不确定性之间存在一个类似的关系： $\Delta E \Delta t > h$ 。

海森伯关系很快就被采用、讨论，并被许多物理学家，包括薛定谔、爱德华·康顿和霍沃·罗伯逊扩展与修正。罗伯逊，一



位普林斯顿的物理学家，因其在宇宙学方面的工作而为人知晓。1929年，他证明了对任何一对共轭变量均有效的不确定关系的更通用的版本；其中一个量（比方说， q ）可被精确确定，但那样一来，另一个量（ p ）就完全不确定了。在试图锐化与推广不确定关系的过程中，他的观点受到一些物理学家的质疑，其论据是：跟一个量的不确定性无关，另一个量不可能小于某确定值。这一观点1928年被美国的阿瑟·鲁阿克和英国的亨利·弗林特所支持，两人都提示 $\Delta q = h/mc$ 。这个关系以及相应的最小时间间隔 $\Delta t = h/mc^2$ ，在1928~1936年，因受到泡利、德布洛意与薛定谔等权威以及许多声望不大的物理学家的支持而被推崇。可是，这思想未能导致有趣的物理应用，所以，到30年代大多数物理学家就放弃了它，从而回到了常规的观点。

因为不确定性关系来自量子力学，它们实际上被所有物理学家所接受。但是，接受其数学是一回事，同意其意义及其哲学蕴涵则是另一回事。显得无辜的 $\Delta q \Delta p = h/4\pi$ 的真实意义是什么呢？如海森伯在其1925年论文中讲得很清楚的，它意味着一件事，那就是：经典的因果概念必须摒弃——不是因为从现在的因推出未来的果不合法，而是因为物理系统绝不能被精确地确定。由于我们只能在量子力学限定的范围内知道现在，我们也就只能不准确地知道未来。“由于一切实验遵从量子力学，因此，不确定性关系，因果定律的不正确性，是一个量子力学本身确定地确立的推论。”海森伯辩护说：“甚至我们原则上不能详尽地知道现在，因此之故，被观察到的每件事都是从大量可能性中的一种选择，是对未来可能事物的一种限制。”（Wheeler and Zurek 1983, 83）当然，人们可以设想，世界在某种深层次上是因果的，而现实性只可能限制在现象世界的范围内。但从海森伯的实证观点，这种反对意见没有新意。“这些猜测，在我们看来，似乎是无价值的和无意义的，因为物理学家必须把自己局限在对于感知之间的关

联的描述之中。”然而，不确定性关系并不必然取消严格的决定论和因果性。30年代期间，这些问题被许多物理学家和哲学家所讨论，在海森伯提出他的原理70年以后，这个问题依然是讨论的一个主题。

如果海森伯的不确定性原理是量子力学的一个推论，那么，玻尔的互补性原理就不是，它是一个相当广泛而较少确定的原则。无疑，这原则的表述多亏海森伯关于量子力学的工作。但是，互补性的思想不只是海森伯原理的一种哲学推广，它是从玻尔在海森伯开始其工作之前，进入量子理论以来众多反思中生长出来的。玻尔第一次提出他的互补思想是在1927年秋纪念伏特逝世100周年的科摩国际物理学大会上。在会上，他强调：在量子力学中，跟经典世界不一样，对一个系统的观察绝不可能不干涉该系统。否则，我们怎么能够说明该系统的状态呢？量子假设似乎意味着观察者与被观察者之间的经典区分不再成立。那样一来，怎么能够得到客观的知识呢？玻尔对此以及相关的问题的反思，使他引入互补性概念以表明：在自然的描述中，用到互补又相斥的观点。两年后，他把互补性原理定义为“一种描述方式……其意思是经典概念的任何一种给定的应用，排斥同时使用其他的概念，而那些处于不同联系中的概念对于阐述现象也同样是必要的”。(Jammer 1974, 93)这大概就是一条暧昧而含糊的互补性原理的最清晰表述。波描述与粒子描述是互补的，因而是冲突的。但是，玻尔坚持物理学家仍能明确地说明他的实验，因为是他选择测量什么，从而摧毁冲突方面实现的可能性。跟海森伯一致，玻尔强调物理学的目的是预言并关联实验结果，不是发现现象世界背后的实在。“在我们对自然的描述中，”他在1929年写道，“目的不是揭露现象的真正本质，而只是尽可能地把我们经验中繁多方面之间的关系追查到底。”(Heilbron 1985, 219)

虽然波粒二象性是互补性原理的标准例子，对玻尔及其信徒



来说，这原理具有广泛得多的意义。玻尔不久就把它应用到物理学的其他领域、生物学、心理学以及一般的文化问题。例如，在1938年国际人类学与人种学的科学大会上，玻尔说明：他们的情绪与感知处于互补关系之中，犹如原子物理测量中的情况。跟哥本哈根纲领联系的其他物理学家甚至走得更远。特别出格的是，约丹把互补性外插到心理学、哲学和生物学中去，夸张到这样的地步致使恼火的玻尔不得不强调这个概念跟生机论无关，不能用作反理性主义或唯我主义的盾牌。约丹对测量过程的极端解释包括：观察不仅干扰被测的量，而且，确实产生它。1934年他强调：“我们自己产生着测量的结果。”（Jammer 1974, 161）

互补原理变成后来被称做量子物理学哥本哈根解释的基石。泡利甚至说量子力学可以类比于“相对性理论”称为“互补性理论”。而且，佩尔斯后来宣称“当你指力学的哥本哈根解释时，你实际就是指量子力学”。（Whitaker 1996, 160）可是，哥本哈根解释的准确含义不会比互补性原理本身的含义更清楚，这意味着它不是很清楚的。它仍然是哲学家以及有哲学倾向的物理学家讨论的问题。其实，“哥本哈根”这个词汇在30年代是不用的，它是1955年进入物理学家的词汇之中的。那时海森伯用它来批评量子力学的一些非正统解释。

30年代大多数物理学家，包括泡利、海森伯、约丹和罗森费尔德，成为玻尔互补哲学的热情支持者，他们把它视为量子力学的核心概念。值得注意的是：几乎所有明确采纳玻尔观点的人都跟玻尔有个人交往，都曾访问过他的研究所。在哥本哈根圈子之外，对互补哲学反应相当冷淡，或者礼貌地漠视，有时甚至是敌视。狄拉克与哥本哈根的人关系密切，他对玻尔也很尊重。但他把互补原理看得一无是处。它不能产生新的方程，不能用于他偏爱的等同于物理学的计算（参阅第十一章）。并非玻尔研究所的所有学生都皈依于互补哲学。例如，克里斯蒂安·莫勒，他在

1926 ~ 1932 年在研究所学习，并在那里度过一生。虽然莫勒是哥本哈根学派的标准人物，深受其精神的影响。可是，在他发表的著作中，看不到互补原理的痕迹。当然，他是谙熟那些论据的，但他对于玻尔强调的广泛概念问题不特别感兴趣。在 1963 年一次采访中，他回忆，“虽然我们听到成百上千次这些事情 [互补与测量问题]，而且我们对它感兴趣。我不认为我们有人花大量时间在它上面，或许罗森费尔德例外。当你年轻的时候，更有兴趣的是攻克确定的问题。我的意思是，它是如此一般的、纯哲学的。”（Kragh 1992, 304）

这也是许多年轻量子物理学家的态度，特别在美国，那里，远远不像在欧洲那样玻尔被尊奉为量子圣人。“近乎哲学的”问题不太被关注。相对于玻尔圈子的人对于物理学的态度，美国物理学家更重实用、更少哲学。他们钟情于实验与特殊的计算，因此用不上互补性原理。在美国人中，对基本问题不感兴趣就不必说了。他们很少沿不同方向发展这些理论，很少像丹麦与德国人那样研究大范围的问题。几个美国物理学家，包括肯纳德、鲁阿克、范弗列克、康顿和罗伯逊，热切地研究不确定性原理。但他们对玻尔的互补性原理并不表现出浓厚兴趣。互补性原理现代重要性的相对平庸，也可以从学生使用的量子理论教程看出。在 1928 ~ 1937 年出版的 43 种量子力学教程中，40 种纳入了不确定性原理的某种处理；只有 8 种提及了互补性原理。尽管世界大部分物理学家不认可哥本哈根解释或对它不关注，反对的声音却是微弱和分散的。无论什么理由，到 30 年代中期，玻尔在确立哥本哈根观点为量子力学的主宰哲学中一直是相当成功的。

反对哥本哈根解释

在 20 世纪物理学的历史中，或许最著名与最罗曼蒂克的事



件是，爱因斯坦与玻尔之间关于量子力学解释的争论。两位渊博而传奇的科学哲人之间一系列苏格拉底式的讨论，已经成为物理学民俗，以及一般文化民俗的一部分。不论他们讨论的细节如何，它们在西方智慧史上有着，比方说，与300年前牛顿与莱布尼兹争论相比拟的地位。人们有时有这样的印象，以为他们在20年的大多数时间里进行着持续的、有时是面对面的讨论。其实，两个人只见过几次面，而且，因各种理由，自上世纪最后25年以来，他们讨论的重要性被夸大与被罗曼蒂克化了。

虽然，量子力学多亏爱因斯坦在1905~1925年间对量子理论的基本贡献，爱因斯坦最初对新理论的兴趣并不太大。他的一般态度是怀疑的，更多基于哲学而非科学理由，他拒绝微观世界只能作统计描述。在1926年12月一封给玻恩的著名书简中，他写道，他的“内部声音”告诉他：量子力学“几乎不能把我们带近撒旦的秘密。……我深信他并不掷骰子”。(Jammer 1974, 155) 爱因斯坦对统计解释的不满产生了一篇1927年初在普鲁士科学院宣读的论文，标题是《薛定谔波力学完全或仅在统计意义上决定着一个系统的运动?》梗概介绍了一种多少类似于马德隆流体动力学理论的隐变量理论。但是，爱因斯坦必定意识到他的选择不满意的，因为他从未将手稿提交发表。

爱因斯坦并未参加伏特大会，但参加了1927年10月的第5届索维尔大会。会上玻尔、狄拉克、海森伯、泡利、薛定谔和其他物理学界首脑人物讨论量子力学的基础。玻尔报告了他关于互补性的新思想，爱因斯坦是第一次听说。爱因斯坦不信服，认为玻尔-海森伯解释与实在性理论相冲突。按照玻尔与海森伯理论，量子力学是关于单个量子过程的完全理论。他讨论了各种思想实验，希望显示不确定性关系不必成立，原子现象可以比海森伯关系更详尽地分析。当玻尔证明爱因斯坦的论据站不住脚时，爱因斯坦就提出新的思想实验，玻尔又反驳之。玻尔量子力学（包括

不确定性关系)是一个完全的理论,穷尽了说明观察现象的一切可能性。无疑,玻尔是1927年讨论的“胜利者”,大多数与会者承认其论据的力量。“玻尔高出每个人,”埃伦哈夫特会后写道,“我有幸聆听了爱因斯坦与玻尔的谈话过程。像下棋一样,爱因斯坦总出新招……玻尔总是从哲学迷雾中找出办法……接招,爱因斯坦像玩具跳偶一样;每天清早跳出来。啊!那是无价的。但我总是无保留地支持玻尔,反对爱因斯坦。”(Whitaker 1996, 210)

爱因斯坦承认玻尔是一个聪明的讨论者,但不是因为他的观点正确。在索维尔大会一年后一封致薛定谔的信中,爱因斯坦讽刺地把哥本哈根解释陈述为“玻尔与海森伯的安逸哲学——或宗教?”他进而说,“它为那些信以为真不易惊醒的人们提供了一个舒适的枕头。”(Jammer 1974, 130)爱因斯坦与玻尔第二轮著名的争论发生在1930年10月的下一次索维尔大会上。这一次,爱因斯坦攻击点集中于能量与时间的不确定性关系 $\Delta E \Delta t > h$,他企图驳斥之。驳斥的手段跟三年前的一样,利用一个思想实验。在他新的、后来称之的光子盒实验中,爱因斯坦利用狭义相对论的质能关系 $E = mc^2$,爱因斯坦坚持:一个光子的能量与它到达一个屏的时间可以被无限精确地预言。但玻尔精明地回答了挑战。这次借助了爱因斯坦广义相对论的红移公式。第二轮争论的结局跟第一轮一样。玻尔关于量子力学的概念得到增强,爱因斯坦的猜疑似乎站不住脚。在那以前,爱因斯坦希望通过显示不确定关系的错误来拒斥量子力学;他对于极终因果性的信念是不动摇的,30年代,他的反对焦点从不一致性转移到了不完全性上。

波函数的统计意义不必排除这样的可能性,即个别原子事件是由尚未发现的参数确定的。在物理学中,这种明确的分层参数的一般假说具有长久的历史,追溯到量子力学的遥远史前。仅举一例,20世纪初,企图利用某种版本的假说来因果地说明放射性



(参阅第四章)。在量子力学的早期阶段，“隐变量”的可能性被承认。但是，由于假设的参量长期没有物理意义，它也就不太被关注了。可是，对于不喜欢哥本哈根解释的人，它是一种可能性，而且是一种具有诱惑力的可能性。如果一个量子力学可以用隐变量表述，而且能再现标准理论的一切结果，那么，似乎就没有理由强迫物理学家接受原子世界的哥本哈根理论了。

隐变量问题属于被匈牙利-美国数学家约翰·冯诺意曼，在其 1932 年的著作《量子力学的数学基础》中考察过的问题之列。他利用希尔伯特空间的理论，对量子力学的基础给出了一个精确的数学表述。在 1933 年的一部著作中，法国物理学家杰克斯·所罗门独立地导出了相同的结论，即隐变量是跟量子力学被接受的程式不协调的。

在其重要著作的很小一部分，冯诺意曼证明：基于隐变量对量子力学作因果解释是不可能的。设想两个系统用同一个 ψ 函数描述。同样的测量一般导致不同的结果，按照量子力学，这归结于非因果性。但是，难道不可用两个系统因隐变量不同而导致测量结果不同来说明吗？冯诺意曼所证明的就是说不行。按照冯诺意曼说法，“因此，那不是如通常所假设的关于量子力学重新解释的问题——为了基本过程的另一种非统计的描述成为可能，量子力学的现有系统本该客观上是错的。”（Pinch 1977, 185）但是，冯诺意曼应允量子力学是错的可能性微小。作为一个物理学理论，它是不可能被数学证明的；“那是夸大其词，以为因果性从此被做掉了。……尽管量子力学与实验一致，而且为我们开辟了世界的新方面，人们绝不能说该理论是经验证明了的，而只能说，它是经验的最为人知晓的总结。”（Jammer 1974, 270）

尽管冯诺意曼言辞谨慎，他的数学被广泛接受，且有时被视为对哥本哈根解释的一种证明。其实，在玻尔立场与冯诺意曼解释之间存在相当的区别，但很少被人注意。例如，对于玻尔与冯

诺意曼来说，“测量问题”是不一样的。玻尔倾向把它视为一个为避免两个互相不协调的、在描述经验中却都必要的经典概念之间矛盾而推广经典构架的问题，他的解决就是互补性。但是，对于冯诺意曼，测量问题意味着提供对于观察者与被观察者之间分界位置给出相同预言的程式的数学问题。人的意识在测量过程中的作用是 30 年代量子-哲学讨论的一部分。冯诺意曼主张意识要素不能被排除，而在 1939 年一个单行本中，弗里兹·伦敦和埃德蒙德·鲍尔明白地宣称：波包缩编是人的心灵的一个有意识的活动。“看来似乎一次测量的结果密切相关于作测量人的意识，量子力学因此而把我们赶到完全的唯一主义。”他们写道，仅主张观察者意识的新作用根本不贬低客观性。在实证主义的精神中，他们满意地注意到在测量境况中没有什么“阻止我们预言或解释实验结果”。(Wheeler and Zurek 1983, 258)

冯诺意曼的不可能性证明对哥本哈根霸主地位的形成过程中起多大作用，是可讨论的，因为大多数物理学家业已相信有良好的经验理由支持玻尔及其同盟者的立场，而冯诺意曼的数学权威极大地有助于这一过程，他的证明常被认作事务的最终判决。几乎没有物理学家对他的证明进行过批判性探究，许多参考过它的物理学家只是扫过它一眼（或只是听说过它——在 1955 年以前，冯诺意曼的书只有德语版本）。个别有能力和勇气的哲学家并不对它太认真。只是到了 50 年代，当隐变量争论又活跃起来的时候，冯诺意曼的论证才变成批判性考察的主题。如英国物理学家约翰·贝尔于 60 年代中期所证明的，冯诺意曼所断定的证明其实并未排除所有隐变量理论。贝尔，在量子力学解释的争论中起着领导的作用，是受玻姆的激励，且一般偏爱隐变量理论。



量子力学是完全的吗？

在1930年“被击败”后，爱因斯坦继续深入思索量子力学的认识论境况，深信自然现象的准确而因果的描述必定是可能的。1935年春刚定居美国，爱因斯坦与他年轻的普林斯顿同事波里斯·波多尔斯基和纳桑·罗森一起发表了一篇简短的论文，标题是《量子力学对物理实在的描述可认为是完全的吗？》论文的最后文稿是波多尔斯基写的，爱因斯坦并不完全赞成其表述方式。三位作者首先陈述物理概念必须对应于物理实在的有关方面。他们的实在性判据是：“如果，不以任何方式干扰一个系统，我们可以确定地预言（即几率等于1）某物理量的值，那么，存在物理实在的一个要素对应于这个物理量。”这对应性导致一个物理理论完全性的必要条件，即“物理实在的每一要素必须在物理理论中有一个对应物”。爱因斯坦、波多尔斯基和罗森（EPR）现在论证：量子力学连同实在性判据导致一个矛盾，唯一的选择就是承认量子力学对实在的描述是不完全的。EPR的论证本质上是负面的，因为它的目的是贬低量子力学的标准观点，而没有提出一个替代方案。在其结论中，爱因斯坦和他的合作者说：“这样的〔完全〕理论是否存在，是个开放的问题。”接着说，“然而，我们相信这种理论是可能的。”（Wheeler and Zurek 1983, 138 ~ 141）

EPR论证使玻尔极度不安，他立即着手发展一个反论证，5个月后准备妥当（对玻尔而言，一名方法论思想家的这种反应速度是很快的）。他的主要论证思路是：拒绝EPR关于物理实在的判据。他发现这判据是无效的，因为它假设了物体与测量仪器可分解成不同部分；按照哥本哈根的观点，这是不可能的，它们构成了一个单一的整体。玻尔细心而迂曲地表述道：

一个像署名作者提出的那样的实在性判据包含……本质的暧昧性……关于短语“不以任何方式干扰一个系统”的意义。当然，在刚才考虑过的情形中，在测量程序的最关键阶段对于所考察的系统不存在力学的干扰，那是没有问题的。但是，即使在这阶段，实质存在这样的问题，即：一种对于条件本身的影响，这条件决定着关于系统的未来行为的可能预言类型。由于这些条件构成“物理实在”可正当地依附其上的任何物理现象的描述的固有要素，我们看到署名作者的论证并不证明他们的关于量子力学描述本质上不完全的结论正确。（Wheeler and Iurek 1983；强调处是原有的）

玻尔-爱因斯坦之间在 30 年代的第三场争论，在物理学家中并未引起太多兴趣；相反，EPR 论证在 60 年代和以后却变得很出名。EPR 论文并未成功地使物理学家放弃哥本哈根解释，而且，一般的印象是玻尔又一次满意地对付了爱因斯坦的非难。对于主流量子物理学家，它只确认了他们一直有的想法，认为爱因斯坦及其同盟者没希望跟上发展的步调——泡利在一封致薛定谔的信中把他说成是“保守的老绅士”。绝大多数物理学家似乎对他们的争论就是不感兴趣。他们容易找到比试图理解跟他们作为物理学家的日常工作无关的哲学论据更好的事去做。

可是，更倾向于哲学的物理学家，包括薛定谔，对 EPR 讨论极有兴趣。在 1935 年的贡献中，这位波动力学之父支持爱因斯坦的观点，并发展了他自己对玻尔的量子理论立场的反对意见。在其中，他提出一个涉及禁锢在密室中的猫的思想实验来巧妙地阐明他的观点。这个密室备有放射性物质和一个邪恶的装置，它随时会被放射原子的一次裂变触发，把一个盛有氢氰酸瓶击破，即刻释放毒气将猫杀死。薛定谔似是而非的结论是：“如果人们让



这整个系统自在一个小时，而且此间没有原子衰变，那么，人们就会说这猫是活的，第一个原子衰变本来会将猫毒死的。整个系统的 ψ 函数会既包含活猫又包含死猫，并将它们各占一半地混合在一起。”（Whitaker 1996, 234）如果按哥本哈根的解释，一个猫可能处于“一半死的”状态，归结于波函数 $\psi = 1/2(\psi_{\text{活}} + \psi_{\text{死}})$ ，那么，难道这不指示某种别的解释可取吗？薛定谔佯谬约从1970年起流传甚广，甚至印在小学生的汗衫上，还有更奇特的其他花样。但在30年代，它并未引起多少争论。玻尔对此不做反应，或许因为发现其前题条件明显有毛病。归根结底，按照他们的观点，像猫这样的宏观物体，或者一瓶氰化钠，不能归结一个波函数。在哥本哈根解释构架内，没有需要解释的佯谬。薛定谔也似乎没有把它真的当作佯谬，他把它说成是一种“十分荒唐的情况”，把它作为一个教训，警告人们不要朴素地把“有污点的模型”当作实际存在的实体来接受。如他所指出的：“它本身（猫案例）不体现任何不清晰或矛盾。在摇晃或没聚焦的照片与云雾边缘的快照之间是有差别的。”（Whitaker 1996）

第十五章 | 爱丁顿的梦与其他异论

20 世纪 30 年代的物理学在导致对于量子世界更完全与更正确的理解的那些新发现与理论新发展并不是连贯的。此间，由于核物理学的繁荣与进步，最终导致量子理论的许多研究课题。大量工作被纳入各种研究计划，其中有的是高度宏观的，旨在表述什么东西事实上将是物理学的新基础。这些企图显然是非正统的，是当时的一时之见。但是，它们却吸引了大量的关注。它们是分散的，但有些具有共性，即都认为物理学密切相关于宇宙学。在哲学层面上，它们有个趋于理性主义与推理优先的取向。这趋势主要是一种英国现象；虽然它鼓舞了欧洲与北美几个物理学家，但只在英国它才有持续的重要性。建立新的宇宙物理学的许多努力已经失败，而且，今天大部分已被忘却。然则，为何还要对它们付诸关注呢？理由之一是：这种关注对于科学进步的简单化与线性化概念提供一副消毒剂。在科学历史上的每一时期，主流物理学一直受到异端观点的挑战，我们常常只在回顾中才看到什么属于前进之路，什么是盲目的错误歧途。理由之二是：30 年代失败了的宇宙物理学的某些进路和目标在战后继续起作用，某些现代物理学家和天文学家对它们依然饶有兴趣。



爱丁顿的基本主义

阿瑟·爱丁顿不仅是世界最杰出的理论天文学家之一，而且也是一位宇宙学的开拓者和广义相对论的权威（以及，还是一位成功的科学与哲学的大众读物的作者）。他对爱因斯坦理论的着迷使他深信张量分析方程——广义相对论的方法——是在其最基本层面上研究物理学的唯一可能手段，因此，当他意识到狄拉克 1928 年的电子方程不是以张量形式表达时，极为不安，从而决定推广与重新解释该方程。1930 年左右，企图在广义相对论的数学构架内表述狄拉克方程，在数学家中是普通的事；但是，爱丁顿的宏旨是以此作为宏大的整个物理世界的出发点。这激励着他发展一个全新的物理理论，从事于一项持续到 1944 年逝世为止的研究计划。

按照爱丁顿理论，一个电子不可能被视为一个个体粒子，而必须关联于宇宙中所有其他电子进行描述。这观点开辟了他以为是微观物理学与宇宙学的深层关联的东西。遵循着早期统一论者的道路，爱丁顿的目的之一是降低自然描述中的偶然性——例如，不把物理学基本常数当作纯实验数据加以接受，而要说明它们。其中一个常数是精细结构常数 hc/e^2 ，它突出地进入到狄拉克理论之中，只知道约为 $1/137$ 。1930 年左右，另一个无量纲的常数被认为具有基本的重要性，那就是：物质的两个建筑砖块——质子与电子——之间的质量比（ $M/m = 1838$ ）。爱丁顿主张精细结构常数值的倒数可推论为 136。1936 年，当实验证明该数值是 137 之后，他提出证据以说明该数值必须加 1。至于质子与电子的质量比，他提示这个数值是二次方程 $10m^2 - 136m + 1 = 0$ 的两个根的比值。鉴于这些数值很小，不直接关联于宇宙，爱丁顿提示：自然常数也可以是相关于宇宙的量，他认为其中重要的量是

“宇宙数”。这个数， N ，就是宇宙被观察到的这部分中的电子（或质子）的数目，近似为 10^{79} 。这数可以从宇宙的平均密度估算出来，但爱丁顿宣称它能够从他的理论中导出来，即 $N = 2 \times 136 \times 2^{256} = 3.15 \times 10^{79}$ 。此外，他主张它跟其他自然常数有如下关系： $\pi e^2 / GmM = (3N)^{1/2}$ ，这里 G 是牛顿引力常数。

爱丁顿推导宇宙与原子的常数的方法，是随其研究纲领的发展而变化的，因此，他所得到的结果不是实质的。1936 年，他在《电子与质子的相对性理论》中收集与精心编制了他的结果。这部著作意愿宏伟，也极不成功。按照爱丁顿理论，对自然的正当理解——在其微观与宇观两个方面——必然涉及萃取诸如基本电荷、普朗克常数、电子与质子的质量、引力常数、光速和宇宙数等基本常数的意义。深思熟虑地把他的观点跟毕达哥拉斯和开普勒的推理联系起来，1935 年他写道：“我们必须这样把宇宙看做是一部以 5 个原始常数作音乐，奏出 7 个音调来的交响曲。”（Kragh 1982a, 82）爱丁顿纲领的核心是为实现这样的目标而奋斗：从认识论的考虑出发，导出自然常数无量纲组合的各种数值，并关联于最终的大数，宇宙数。

寥寥数行是不可能描述爱丁顿的方法的。它们不仅是复杂的，而且是随研究的进展而变化的。然而，他的认识论基础基本保持不变。这个基础就是：狄拉克方程描述了电子与整个宇宙的结构关系，即电子的波方程与膨胀宇宙的广义相对论场方程对称地成立。结构，而不是物质，是物理学的实质。更一般地，爱丁顿深信：从人类心灵的奇特本性获得自然基本定律的知识，是可能的。“一切通常归结于基本的自然定律，”他写道，“能够从认识论的考察中全部预见到。它们对应于一种先验的知识，因此，完全是主观的。”（Kragh 1982a）

爱丁顿的观点以“选择主观主义”为其特征，就是说，我们的感知与智能器官具有一种选择效应，即它大体上决定着我们的关



于自然世界的知识。他并不否认一个客观世界的存在。但他把它等同于意识的与精神的世界，不等同于物理学家通过实验研究的现象世界。如果自然定律本质上是物理学家的主观构建，那么，经验演绎方法在基本物理学中就很少或没有地位了。爱丁顿认为，他的理论“并不建立在……可观察的检验上。它甚至更是纯认识论的，而不是宏观的理论……不从自然书本中找答案，判断数学处理与解答是否正确，应该是可能的”。(Kragh 1982a)

对爱丁顿来说，与实验一致不起重要作用，但当然他不能忽视 30 年代发生的经验知识的发展。例如，他原先假设的基本粒子仅包括电子与质子，而当新粒子（如正子与介子）被发现时，他多少把它们纳入其体系之中。他这样做了，但做的方法明显是特设的，大多数物理学家觉得是人为的。同样，他用了量子力学诸原理，却不同于通常理解的量子力学。爱丁顿依靠海森伯不确定性原理证明：量子力学意含宇宙是一个整体，以及孤立的物体没有测量的性质；但他使用不确定性原理是跟量子力学的标准解释大不一样的。爱丁顿怪异地利用泡利不相容原理的情形也一样，他试图在这原理基础上构建一切基本相互作用的理论。

爱丁顿在大量文章与著作中发展他的宇宙物理学体系，他并未成功地说服其他物理学家相信它正确。除个别例外，他的理论遭怀疑与漠视。在其晚年，他埋头撰写一部其理论的综合与校正说明，但未等著作完成他就逝世了。这本题为《基本理论》的遗作于 1946 年出版。虽然它被某些物理学家和哲学家所研究，并被少数物理学家寻求进一步发展，但其影响是有限的。像爱丁顿理论的早期版本一样，它拥有难懂、怪异、晦涩，当然还有迷人的声誉。1936 年和 1946 年两部著作都成了名著，但更多的是因其晦涩性而不是其科学价值。

尽管爱丁顿失败了，但他的宏伟规划不是没有蕴涵的，而且获得某种支持。薛定谔发现爱丁顿的进路具有吸引力。在 30 年

代，为了构建量子力学与宇宙学的统一理论，他热情地启用了它。薛定谔的目的是用支配宇宙的相对论场方程来说明量子化，在这意义上，他给予经典场论高于量子非连续性的优先权。如他1937年致信索末菲尔德所写的：“这世界是有限的，因此，它是量子的——由于一个有限的系统具有分立的固有频率。这样一来，广义相对论产生了量子理论。”（Rueger 1988, 395）虽然薛定谔未能实现他的统一方案，他的努力使他进行了闭宇宙模型中波函数的开拓性研究。同其他结果一道，他发现：在一个膨胀的宇宙中，存在从真空中形成粒子的可能性。在当时，这类结果是不受称赞的。但是，在事后的反思中，这些结果标志着，开辟了一条处理量子场与引力场相互作用的研究路线。只在很久以后的70年代，这类研究才变为天文物理学家和引力的量子理论专家一个感兴趣的领域。

宇宙数字命理学与其他猜测

爱丁顿不是把注意力引向自然常数无量纲组合的可能意义的唯一人，但那是他特别激励了许多物理学家从事于一些类似的考虑的工作。例如，驰名的德国物理学家莱霍尔德·弗瑟，1929年，他利用他自己的爱丁顿理论版本，纯理论地推导了质子-电子的质量比为1838.2。此外，他主张假说中的中子——一个复合的质子-电子系统——质量可表为公式 $M_n = 16^{16} (hc/\pi G)^{1/2}$ 。弗瑟只是这个时期认真对待这类数字命理学论据的许多物理学家之一。有些爱丁顿的追随者集中关注于微物理学的小数字，另一些则关注于宇宙学和很大的数字，有些则试图建立原子量与宇宙量之间的关系。阿瑟·哈斯，奥地利-美国物理学家，回到1910年他在原子理论中引入了作用量子（参阅第四章），是另一位多产的爱丁顿派。1934年他出版了《物理学的宇宙问题》，两年后，



在他离开维也纳到了美国之后，他从基本的、但武断的假设出发推导了宇宙的质量。

由弗瑟和哈斯的工作所体现的数字命理学猜测在 20 世纪初有群众基础，但大多数主流物理学家认为吻合不具有说服力，因而对它们不予理会，或者，如汉斯·贝特、盖多·贝克和沃尔夫冈·里兹勒于 1931 年在《自然科学》撰文讽刺他们那样，嘲弄他们。这三位年轻物理学家佯装从爱丁顿的理论推导零点温度为 $T_0 = -(2/\alpha - 1)$ ，这里 α 是精细结构常数。如他们所快乐说明的，“令 $T_0 = -273^\circ$ ，我们得到 $1/\alpha$ 的值为 137，在精度极限内跟全然独立的方法得到的数值理想地一致。”当发现这论文是一个玩笑时，杂志主编为三位物理学家的坏行为而道歉，并说明嘲弄性的模仿作品是“刻意披露近年来理论物理学中一些论文的特征，它们是纯臆测的，基于不合逻辑的数字吻合”。

然而，猜测与富有成果的想象的差别是很小的。爱丁顿的数字命理学不仅吸引着第二流的物理学家，我们还看到：狄拉克深信数字吻合具有深刻意义。在 1929 年一篇论文中，索末菲尔德，不是一位被松散猜测所吸引的物理学家，判断爱丁顿关于精细结构常数的推导是“极美的和令人满意的”。其他杰出的物理学家，包括列维斯、朗道、伽莫夫、约丹和钱德赖塞卡，默认了爱丁顿所培育的数字命理推理的弱点，虽然他们谁也不接受他的理论。

数字命理学不是 30 年代泛滥的臆测理论的唯一形式。例如，有一个可追溯到 20 年代中期（其渊源更早）的、考察分立时空假说的小传统。这假说有几种不同的形式，但通常都包含一个最小长度概念和一个相应的时间原子概念，或最小间隔。1930 年左右，几个物理学家提示时间原子的观念，并企图用它来说明宇宙辐射中的现象、化学元素的最大数目、量子电动力学的无穷大以及某些其他问题。如第十三章所描述的，德布洛意、薛定谔、因费尔德、泡利、朗道和海森伯全都认真讨论过关于空间与时间可

能从属于绝对量子不确定性的提议，其典型量是 $\Delta q = h/mc$ 与 $\Delta t = h/mc^2$ 。

其他一些名望较低的物理学家也发表过分立时空的各种理论，这些理论很少涉及实验物理学或量子理论中的流行理论问题。在某些情形中，这些理论是受到爱丁顿企图建立一个极大与极小的统一理论的激励。基于分立时空观念表述新物理学的一个最精细制作，是波兰-美国物理学家路德维克·斯尔贝斯坦做出的。1936年，他出版了关于这一主题的单行本。他并不觉得这是可质疑的，因为如他所写的，“所有物理学家倾向于相信我们通常的克分子物理学，包括我们的时间与空间概念，在这种境况下不可应用。”（Kragh and Carazza 1994, 460）虽然，在极端短的距离上摒弃连续时空的一般思想，对于30年代的领导理论物理学家并不陌生，他们很少有人认真考察这一思想。这个假说从没有发展成一个富有经验成果的理论，而且，它继续保持跟基本理论不搭界。虽然如此，爱丁顿的基本理论也罢，分立时空理论也罢，都没有从物理学舞台上完全消失。在第二次世界大战之后，少数物理学家不顾长期失败的记录继续培育它们。

米尔恩与宇宙物理学

爱德华·米尔恩，杰出的天文物理学家，21岁被聘为曼彻斯特大学应用数学教授，从1929年起任牛津大学教授，发展了他自己的、原始的宇宙物理学系统。在某些方面，他的系统跟爱丁顿的极不相同。例如，宇宙物理学与原子物理学之统一是爱丁顿计划的核心，但是，米尔恩并不认为这种统一的努力有趣与有用。然而，当说到关于合法科学推理的基本争论时，两个体系却有着许多共同点。两个体系都是巨大的、宏伟的、更像生命哲学而不是通常的物理学理论的重建规划。爱丁顿与米尔恩都主张演



绎论，它是一种基于先验原理的概要思维，运用理性推理从这些先验原理推演出自然定律来。1933年，米尔恩开始发展他的宇宙学理论。1948年，他对其理论给出一个综合性陈述；不过到那时，人们对其理论的兴趣在下降。

米尔恩觉得广义相对论在数学上与哲学上都是怪异的。在他看来，空间不是一个观察的物体，而只是一个参考系，因而没有结构，无所谓弯曲不弯曲。在他1935年对其理论的系统陈述《相对论、引力与世界的结构》中，他主张：宇宙物理学的一切定律都能从少数原理中推导出来。其中大多数可以从用来分析序化历时经验和利用光信号沟通经验的概念中得到。由这些考虑产生的物理学是“运动学相对论”，米尔恩就是这样称呼他的体系的，因为它不涉及原初诉求于动力学或引力的各种假设。

米尔恩的世界体系的基本假设就是光速的恒定性以及宇宙学原理。按照这原理，宇宙在大标度上是均匀的与各向同性的。基于这两条原理，无须利用广义相对论场方程，米尔恩导出了一个均匀膨胀的世界模型，还发现牛顿的引力常数实际上不是一个常数。按照米尔恩理论，它缓慢地随时间而增加，即 $G \approx t$ 。可是，这种比例性的物理意义不很清楚，而且，米尔恩并不认为它是可检验的。理由是，米尔恩的整个系统是约定的，而且，他用到各具自己物理蕴涵、全是约定、原则上可自由地使用的不同时标。关系在“运动学时间”(t)中，但不在通常的牛顿时间，米尔恩称之为“动力学时间”(τ)中成立。两个时标之间按规则 $\tau = \log(t/t_0) + t_0$ 对数地关联，其中 t_0 代表现在纪元。因此，在动力学时标中， G 退化为一个常数，宇宙保持静态，它有一个无限的过去。至于哪个时标代表真实的宇宙，米尔恩认为这样的问题是没有意义的。按照他的理论，两种描述只是同一物理实在的两个不同版本。他宣布：什么“真正发生着”的说法，在科学上是不合法的。

不论就其结果还是就其方法论而言，米尔恩的运动学相对论体系跟传统物理学是南辕北辙的。他的方法论是实证论与唯理论的特殊混合。他认为宇宙包含无数个粒子，但意识到这是不可验证的，所以强调他的世界物理学最终依赖于哲学推理。例如，虽然观察验证宇宙中有限物体的存在是可想象的，但要验证无限数的存在则是不可想象的。哲学家的心安理得在于：尽管通常物理学大大吹嘘纯观察与实验支配与主宰着物理世界，但世界物理学家则提出关于客观而非形而上学的、不可能被观察回答、却必须回答的许多问题，归根结底要依赖纯推理来回答；自然哲学是某种比可观察的全体还要大的东西。1937年，关于他的纲领他写道：“除了一个历时经验的存在，没有任何经验诉求，我努力发展〔我理论的〕推论，对每一个观察者关于以前与以后关系的悟性。”（Kragh 1982a, 78）虽然，米尔恩体系主要关联于宇宙学，他也相信这体系允许他从纯运动学原理演绎出动力学、电磁学，以及甚至原子论来。他强调这种演绎进路是跟通常的经验归进路大相径庭的，而且，阻止用那种原子理论来理解宇宙诸定律的还原论企图。可是，在宇宙论之外，米尔恩重新构建物理学的企图是很不成功的，简直没有被他的物理学同事认真看待。

1938年6月在国际知识分子合作委员会（国际联盟的下属组织）和国际科学协会理事会共同赞助下在华沙召开了一个“物理学中的新理论”讨论会。会上，宇宙物理学家与比他们的更正统的同事们相聚。玻尔、冯诺意曼、德布罗意、克拉默斯、克莱因、布里渊等报告了量子力学各方面的主题，收录在1939年会议汇编《物理学的新理论》中。爱丁顿报告了《量子的理论在数字命理学中的应用》，包括爱丁顿宇宙半径（400百万秒差距[Mpc]）、哈勃参数（432千米/秒·百万秒差距）和宇宙数（ 3.145×10^{79} ），以及诸如 $N/R^3 = 50m_p m_e c/3h^2$ 之类的数字关系的推导。这个报告遭到克拉默斯、冯诺意曼、罗森费尔德、玻尔和



其他人的反对，他们没有一个人认可爱丁顿对于量子力学的使用。米尔恩的报告《研究核动力学的一种可能模式》是在他缺席中由理查德·达尔文代为宣读的，也不受欢迎。跟爱丁顿一致，米尔恩主张：“任何给定〔基本〕粒子对于宇宙其余部分的关系不能在这类讨论〔粒子间的相互作用〕中忽略。”与爱丁顿相反，米尔恩在他讨论核动力学时简直忽略了量子力学：“不能向我理性地提供波函数、电子自旋等，我不得不以我自己的方式试图理解事物；结果是在一个理性基础上部分地，但对我是满意地，重建一些确定部分的物理学。在这种重建中，每一个方程都具有一定内容命题。”

如果从量子物理学的角度来看，米尔恩的异端体系可能像是疯人的作品，那么，说到它是宇宙学，其声誉与影响则是不同凡响的。事实上，米尔恩无可争辩地是 30 年代最有影响的宇宙学家，而且，在很大程度上，他的观点开辟了理论宇宙学中的许多讨论。1932~1940 年，出现了约 70 篇相关于米尔恩理论的各个方面的论文，这意味着该理论在这个时期具有主宰地位。虽然米尔恩没有建立宇宙学派，但英国（以及少数别的地方）许多最有影响的理论家在从事于由米尔恩思想界定的问题领域内的工作。其中有：格拉尔德·维特罗、威廉·麦克科里、阿瑟·沃尔克和乔治·麦克维蒂，他们全都深受米尔恩世界体系的影响，而在宇宙学做了重要工作。这个体系对于后来的稳态理论也有颇大的重要性。但在战后，它很快离开了主流，并随着米尔恩 1950 年逝世，人们对于体系的兴趣也就消亡了。米尔恩的世界物理学理论，作为接受这类思想的一个较大精神氛围的一部分而曾繁荣过。但是，随着战后知识氛围的转移，这一理论开始显得像是过时的一种古玩。对于米尔恩，他的世界体系不仅是一个物理理论，也不仅是一个哲学理论；它包含了物理与哲学以及宗教。像较老学派的宇宙学家一样，他相信他的宇宙学体系，相信它单独

能证明基督上帝和创造者的存在。

现代亚里士多德人

在1937年一份显然受爱丁顿与米尔恩激励的简短注中，狄拉克提议重新考虑以可从自然的基本常数构造的无量纲大数为基础的宇宙学。狄拉克的基本假设是大数假说——自然中出现的一切很大的无量纲数是互相关联的。他对于量级为 10^{39} 与 10^{78} 的数赋予特别的意义，理由是，用 c^2/mc^3 作时间单位，他取宇宙年龄为20亿年，约为 10^{39} ，它几乎同 $\frac{e^2}{GmM}$ 一样，就是说， $T/(c^2/mc^3) \approx e^2/GmM$ ，这里 T 是哈勃时间（哈勃参数的倒数）。如果数值吻合有意义，那么，这会导致引力“常数”随时间而减小，如 $G \approx t^{-1}$ ，就是说，虽然米尔恩提示它是逐渐增加的，狄拉克则认为引力是逐渐减小的。狄拉克同意爱丁顿的看法：无量纲的大数所展示的规则性不是纯偶然的。但是，爱丁顿与大多数其他人相信诸常数是独立于宇宙的膨胀（或宇宙时）的，狄拉克则认为它们是一些依赖于宇宙历史的伴随量。

大数假说的另一个推论来自于常数 $\rho(cT^3)/M$ ，这里 ρ 是物质的平均密度， $cT = c/H$ 是可观察宇宙的半径、哈勃半径。由于这常数——给出宇宙中粒子的数目——具有爱丁顿宇宙数 10^{78} 的量级，而且，这是原子时间中周期的平方。狄拉克由此得出结论，粒子数将随时间按定律 $N \approx t^2$ 而增加。这两个提议——引力常数随时间减小而物质则自发增加——是极不正统的，而且，跟广义相对论冲突。第二年，1938年，狄拉克决定宇宙物质归根结底是守恒的。他宣称：物质的守恒可以跟大数假说相协调，而同时又维持引力常数减小的思想。

狄拉克冒险进入宇宙学，对于同时代的宇宙学没有什么影



响。大多数天文学家和物理学家缄默地接受他的非正统理论，如果不烦恼的话。然而，从长期角度看，狄拉克的猜测比被大众议论的米尔恩理论更有影响力。该理论的持续影响，后来证明是大数假说本身，而不是关于引力常数的思想或拟议中的具体宇宙模型。

关于自然常数大组合之间的基本关联的一般思想，证明是战后宇宙学和基本物理学的连续迷惑力的源泉。30年代启用狄拉克思想的少数物理学家之一是帕舒尔·约丹，他着手直接把它发展为一个更具综合性的理论，并寻求它跟广义相对论的协调。在约丹的版本中，不仅引力常数随时间减小，物质也随之自发创生，然而却不破坏能量守恒定律。

爱丁顿、米尔恩、狄拉克、约丹和其他人的理论，并不为那些对于理论宇宙学崛起越来越不满的科学家与哲学家所接受。大多数主流理论物理学家偏向于忽视这种趋势，但在英国，作为主流理论的据点，理论宇宙学在30年代末期遇到公开敌视和召至一场文化斗争。赫伯特·丁格尔，一位天文学家和科学哲学家，怒斥新的“无骨气的宇宙学的赝科学”，及其所谓的“现代亚里士多德派”的失衡的先验方法。在丁格尔的观点中，接受爱丁顿、米尔恩和狄拉克的方法就意味着从伽利略时代起就为人知晓的经验物理学的终结。按照丁格尔说法，实验知识不是先验原理，它应该构成物理学的基础。但是，米尔恩则认为：对于自然的完全理性说明，既是渴望的，也是可能的。1937年，在回应丁格尔中，米尔恩陈述他的观点如下：“宇宙是理性的，我们给定什么的起码陈述，所得到的定律可从一个推理过程演绎出来。用怀特海的话来说，这就不会有两个创造[物质与定律]，而只有一个，我们只剩下创造的超非理性。我们只能靠放弃的行动，以及靠探索从某种关于所是的假设描述推演出什么是应该遵循的定律的可能性，来检验这种信念。于是，自然定律就不会比几何定

理更武断了。上帝的创造就会归因于定律，而非他的下回随意行为。”（Kragh 1982a, 100）

30年代末期英国关于宇宙学的争论，是现代物理科学中罕见的事件之一。在那里，物理学的基础，包括其承受的社会与意识形态的各种争端被讨论。丁格尔关注的是：现代亚里斯多德派的观点会创造一种知识氛围，它不仅有害于科学，而且，在更广大的意义上，也不利于批评与科学的精神。“公众的心态被教育成用其不理解性来衡量一个思想的价值，因其可理解性而蔑视旧有科学。这是一种什么样的心态呢？”他问道，“时代不是那样繁荣昌盛致使我们能够安稳地处于这样的心态之中：最适宜存活的思想不是那些跟经验最有合理关系的思想，而是那些可能披着伪深奥外衣、给人深刻印象的思想。在欧洲大陆，有足够的证据证明存在‘不求助于实验而靠理性演绎’的教条的种种影响。”（Kragh 1982a, 102）丁格尔心目中或许有纳粹德国与前苏联等大陆专制政权种种负面阴影。丁格尔的警告被约翰·伯纳尔，一位马克思主义者响应。1938年，在其《科学的社会功能》一文中，没有特别指明爱丁顿与米尔恩，对于已深入到科学本身之中的“神秘主义与摒弃理性思维”极为反感：“科学理论，特别是那些触及大范围宇宙或生活本质的、在18和19世纪被耻笑地拒绝了形而上学与神秘主义的理论，正走在企图赢回被科学接受的旅途上。”（Bernal 1939, 3）尽管丁格尔与伯纳尔的警告有效，宇宙物理学的发展是短命的，事实上，它并没有威胁到通常的物理学。无论如何，英国物理学家不久有别的需要担心的事。在1939年8月以后，他们成功地集中于军事定向的物理学，这是离开理性的与唯心的宇宙物理学的一个清闲领域。华沙大会主席在其为《物理学中的新理论》撰写的引言中，抱歉“许多德国、意大利和俄国的同事的缺席，尽管他们怀有跟所有学术同仁的兄弟情怀，但他们的处境阻止他们的出席”。我们现在就转向他们的处境。

在卍字饰的阴影下

随着 1933 年 1 月 30 日阿道夫·希特勒夺得帝国总理权力，欧洲历史上一个新的、悲惨的篇章开始了。李瑟·迈特勒是纳粹党把德国沦为一个独裁政权之前不久听到希特勒广播演说的许多人中的一个。在一封致奥托·哈恩的信中，她把这演说描绘成一个温和、老练和私人的演说，并写道：“有希望的事业将以这种面貌继续下去。……现在每件事都依赖于理性的节制。”（Hentschel 1996, 18）但是，理性的节制不是接下来几年的特征。李瑟本人 5 年后不得不逃离德国。在很短的时间内，新的统治者清楚表明：德国发生着一场革命，将严厉地推行纳粹党的政策。这意味着：连同其他事务，其他政治党派被禁止，犹太人和社会主义者不得拥有帝国公务员职务。按照 1933 年 4 月 7 日的《恢复国内职业服务法》，一个非北欧日耳曼人血统指父辈与祖辈双亲中有一人是非北欧日耳曼人。贝特就是这样一个人，1933 年 4 月他致信索末菲尔德道：“你或许不知道我母亲是犹太人，因此，按照新的国内公务员法令，我是非北欧日耳曼人血统，因此不适合在德国帝国公务机关工作……我没有选择；我必须相应

行动,在某个国家找到适合我的工作。”(Eckert and Schubert 1990, 83)

按照 1933 年 4 月的法令,第一波解雇浪潮中竟包括 1000 多名大学教师,其中有 313 名全职教授。如此偏激的措施——而它仅仅是开始——不可避免地有损于德国的科学与技术,但这对于统治者只是次要的问题,他们既不理解科学也对它不感兴趣。有一次,当马克思·普朗克谨慎地向希特勒进言,说解雇犹太科学家会损害德国。弗勒(按照一种说法)大怒,回应说:“我们国家的政策绝不撤消或修改,哪怕为了科学家。如果解雇犹太科学家意味着当代德国科学的消灭,那么,我们将没有科学干上好多年!”(Beyerchen 1977, 43) 德国大多数民众可能已认同弗勒,人们对于遣散犹太科学不是赞同就是不关心。一位 1933 年 6 月访问过德国的美国科学家,在一封信中描述:“大多数人并不咒骂之;大部分人倒是为这一切的发生而高兴,那些为之不安的极个别人倾向于公开不说任何话,甚至私下也如此。”(Weiner 1969, 205)

德国科学家像其他群体一样,对新的局势反映不一。极少几个公开抗议,更普遍的反映是一种安静的担忧,并试图达到对于统治者的某种理解。有些犹太物理学家在抗议中辞职。大多数非犹太物理学家强烈地受制于他们的国家,抗议者或出于其个人的利益,都没有离去的意向。普朗克、劳厄和海森伯是属于那些认为留下来是他们的职责,不仅为了祖国更重要的为了德国物理学的科学家之列。当爱因斯坦于 1937 年 3 月公开向普鲁士科学院辞职时,科学院急切地安抚政府,控告他有“鼓动行为”。劳厄对爱因斯坦提议应该少一点政治情绪与多一点自我克制。但是,爱因斯坦现在安定地在德国境外,无所顾忌了:“从德国的境况,你可以看到正是这种自我克制导致现在的处境。它意味着:投降的领导向盲目的、不负责任的当局屈服。难道这背后不是一种缺



乏责任感吗？如果吉欧丹诺·布鲁诺、斯宾诺莎、伏尔泰和洪堡过去是这样想、这样做的，那么，我们现在处在何方呢？”（Hentschel 1996, xi iii）当然，也有欢迎新政权的物理学家，他们或者相信纳粹事业，或者，至少同情它们的一部分，或者，因为他们看到在变化的局势下一种继续其生涯的方式。1933 年以前，只有极少数科学家是纳粹党员，但在德国共和时期，所有政党基本上在科学家与学者中没有其成员。1933 年以后，纳粹党员急速增长，特别在青年科学家中（值得回味的是大学生是希特勒最热心的支持者）。德国核动力项目有 71 名科学家，其中大多数是德国的核物理学家。涉及这项工作的物理学家中，56% 是党员；而在 1933 年以前，党员占 8%。

1933 年以后，科学-政治基础和支持系统改变了，但德国共和时期的许多研究所继续存在。德国共和时期的最重要的研究基金机构基金委员会继续起主导作用，虽然自 1937 年起改在德国研究协会的名下。帝国物理技术研究所不仅是另一个继续存在的研究机构，而且大大地扩展了。在帕森被迫于 1933 年退休之后，领导权被约翰尼斯·斯塔克接管，他是纳粹党员，也是基金委员会主席。斯塔克重新组织了帝国研究所。1938 年成员扩展到 144 人，其中有 138 名科学家。根据他对于纯物理学的低调评价，斯塔克研究倾向集中于技术与军事物理学，而不是帕森所寻求的主流物理学。

普朗克任主席的威廉皇帝协会，在 1933 年以后的 10 年是一个生长期，威廉皇帝物理所筹划于 1917 年，但在德国共和时期只停留在纸面上，在政府以及洛克菲勒基金拨款 2 兆德国马克的共同赞助下，最终于 1937 年建成。一所大的、装备优良的研究所，其首任主任是荷兰出生的彼特·德拜，很快变成了德国首屈一指的物理研究所。就经费与研究机构而言，德国物理学家没有理由对新政权不满。

由于政府的排异已政策，德国物理学在量与质上受到严重摧残。一个可靠的估计是德国损失了其 1932 年物理学共同体的 25%。大学雇佣的物理学家从 1931 年 175 人降到 1938 年的 157 人。但这个降低大体上被技术学院工作的物理学家的增长所补偿。因此，尽管通过移民物理学家严重外流，大学总体物理学家的人数仍保持不变。但是，跟美国情况相比，那里物理席位连续增加，这种停滞就是一种病态了。更重要的是，离开德国的物理学家代表一个有能力、有经验、有原创性的群体，简直是不可替代的。以哥廷根为例，那是量子力学的诞生地和一所拥有大量杰出犹太物理学家与数学家的大学。马克思·玻恩、詹姆斯·弗朗克、沃尔特·海特勒、汉里希·库恩、罗瑟·纳德哈姆、尤金·拉宾诺维奇、赫尔塔·斯帕纳和爱德华·泰勒全被解雇，或被迫离开大学，这意味着物理所几乎空城了。哥廷根虽然说算是一个例外，而事实上，在 36 所德国大学和技术学院中只有 15 所，才因政治原因解雇教师。然而，受到最严重摧残的，是最大与拥有最先进研究所的大学，特别是哥廷根和柏林。技术学院没受到大打击，吉纳大学是一所没有犹太人任职的、保守的大学，没有一人被解雇。一般地，越是理论定向的研究所，解雇的人越多：在有 60 名理论物理教席的德国大学，理论物理教师被解雇的不下 20 名。科学人才的外流是令人注目的。1933 ~ 1940 年在德国被迫移民或感觉压力的物理学家中有 5 名诺贝尔奖得主（爱因斯坦、赫兹、薛定谔、赫斯和德拜）以及另外 8 名后来在物理或化学方面诺贝尔奖的得主（斯特尼、布洛赫、玻恩、维格纳、贝特、伽勃、赫维西和赫兹伯格）。更详尽的移居国外的人员情况见表 17.2。

1933 年 6 月约翰·冯诺意曼向普里斯顿数学家奥斯瓦尔德·维布楞报告德国的局势，他发现那是“很郁闷的”，他说：“我们在哥廷根有三天，其余时间在柏林，有时间看到和品味德国人疯



狂的种种恶行。那简直是可怕的。在哥廷根，那是很显然的，只要这些孩子再干两年多（不幸地，这是很可能的），他们将毁灭一代人的德国科学——至少。”（Weiner 1969, 205）当纳粹政权反犹太科学家的举措现实，被其他国家所知晓时，许多外国物理学家便作出回应。首先是避免访问德国，取消德国期刊的订购，辞退在德国科学机构的任职。这些，以及对德国人出国旅游的限制，使德国物理学受到越来越严重的国际孤立。从 1936 年起，德国科学家（以及俄罗斯与意大利的科学家）被禁止出席与国际同盟有关的一切会议。1937 年纳粹德国禁止德国人接受诺贝尔奖。沙缪尔·哥德斯米特比大多数物理学家更直言不讳地批评纳粹政策。他退出了德国物理学会，理由是：“我对于作为一个整体的学会对那种恶毒攻击其著名会员的行径毫不抗议表示不满。还有，德国新闻基本不报道物理学成果，德国的主要出口宣传就是仇恨。”（Beyerchen 1977, 75）有几个外国物理学家步哥德斯米特之后尘，退出了学会，使得学会成员在 30 年代一直在减少。虽然德国物理学会竭力维持一条相对独立的路线，以避免它的犹太人会员被驱逐。但至 1938 年末，作为学会主席的德拜已感受到当局要将所有犹太人赶出学会的压力。到 1940 年，德拜已忍无可忍，就离开了德国去康纳尔大学任教。

大多数外国物理学家在如何行动上举棋不定的，他们小心翼翼不破坏跟他们的德国同事的关系。他们反对希特勒和纳粹政策，不反对德国人。美国物理学家和后来的诺贝尔奖得主佩斯·布里奇曼是个例外。1939 年初，他在《科学》上发表一个声明，宣布：“我决定从现在起不再显示我的学术注释或讨论我的关于任何集权主义国家公众的实验。”当然，他意识到这一步是反对科学国际主义理想的。但他坚持“现在关于科学功能的理想概念已经被毁灭了，并且……或许，在现在的情况下的唯一出路，是使集权国家的公民尽可能生动地与快速地认识，他们国家的哲学

是如何传播与影响世界的其余地方的。”（Hentschel 1996, 185）

德国物理学家与科学管理人员清醒地认识到德国在许多重要的物理学领域不再能够同美国竞争了。他们也知道但不明说，纳粹的解雇政策对物理学的沉沦负主要责任。卡尔·雷姆绍尔，公认的应用物理学家，是 AEG（通用电器公司，德国最大的工业公司）的研究部主任。1942 年，他在致科学、教育、文化秘书贝恩哈特·卢斯特的备忘录中警告：德国物理学已经明显落于美国物理学之后。一方面，《物理学纪事》1913 ~ 1938 年的美国人引文从 3% 上升到 15%，雷姆绍尔发现，在同一时期，德国人在《物理评论》——国际承认的物理学领导期刊之一——的引文从 30% 下降到 16%。在核物理学方面，雷姆绍尔表明：美英的研究起主导地位：1927 年，《物理报道》列出德语的核物理学论文 43 篇，英语 35 篇；12 年后的数值是，德语 160 篇，英语 471 篇。“在这最现代和兴旺的领域，德语论文增长了 3.5 倍，而英语论文却增长了 13.5 倍。然而，如每一位核物理学家所认定的，美国论文的质量至少与德国论文的相当。”

后来的历史学家分析了类似于雷姆绍尔的数据，以便对于纳粹对德国物理学的影响提供一个更详尽的图景。在量子力学内，包括量子电动力学，1926 ~ 1933 年，所有德语出版物的 25% 是由后来离开德国的物理学家撰写的（表 16.1）。一个类似的图景对于核物理学也成立，那里的数字是 18%。此外，以其在物理文献被引用的频率可以看出，未来移居者的论文远高于平均数。在其他领域，未来移居者的论文不明显；一般而言，移居者在理论性强的与现代化的领域有较大份额，而在实验性与传统领域份额较小（表 16.2）。德国物理学所有领域的移居者的论文平均占 10.8%。他们大多数论文是发表在有理论定向的、进步的《物理杂志》上（14.5%），只有很少的发表在较保守的《物理学纪事》上（占 5.9%）。



表 16.1

量子理论的出版物

年	出版物		后来的移民所撰写	
	总数量	德语中的百分比	数 量	占德语出版物的百分比
1926	173	49.7	16	18.6
1927	319	50.8	42	25.9
1928	295	44.4	31	23.7
1929	286	43.4	28	22.6
1930	326	44.5	35	24.1
1931	208	50.5	33	31.4
1932	170	30.6	12	23.1
1933	153	38.6	20	33.9
合计	1930	44.8	217	25.1

注：基于 Fischer 1988 的资料

表 16.2

德语出版物中物理学的领域选择

物理学领域	德语出版物	移民撰写	百分比
量子理论	864	217	25.1
核，放射性，粒子射线	532	100	18.8
光谱	958	123	12.7
流体与气体力学	1740	163	9.4
技术力学	1030	58	6.6
声学	482	18	3.8
合计，所有领域	23216	2505	10.8

注：基于 Fischer 1988 资料

一般而言，纳粹当局不反对科学，他们投巨款于科学研究。1933年，德国物理学沉沦了，但高规格的理论实验研究都继续着。海森伯和他的团队在莱比锡大学，仍处于量子场论和宇宙射线研究的世界领导行列之中；冯维兹瑟克在核理论和天文物理学方面做了重要的工作；在固体物理学中，罗伯特·泊尔、沃尔特·肖特基和其他人做出了有意义的贡献；在核物理学与化学方面，迈特勒、哈恩和斯特拉斯曼的工作导致核裂变。甚至在纳粹意识形态毒化了的环境下，进行高水准的物理学研究仍在进行中。

北欧日耳曼人物理学

1936年，菲力普·勒纳德，物理学退休教授，出版了一套四卷物理学教程，冠名为《德国物理学》，在前言中，他为书名辩护：“你会问‘德国物理学？’——我也可以说是北欧日耳曼物理学，或者，北欧日耳曼民族气质的物理学，探索实在、寻觅真理的物理学，奠定科学基础的人的物理学——‘科学是国际的，永远都是这样的！’你会抗议。但是，这不可避免地是基于一种虚妄。其实，跟人创造的任何事物一样，科学是由人种或血缘确定的。不同种族以不同方式混合着实际的科学。”（Hentschel 1996, 100）勒纳德在其著作中所辩护的德国物理学或北欧日耳曼物理学可追溯到20年代初它的起源。那时，勒纳德和一群其他的德国右翼物理学家攻击爱因斯坦的相对论，以及更一般地，现代理论物理学（见第七与第十章）。认为存在依赖于种族与民族的、不同形式的物理学的观点，跟希特勒的《我的奋斗》和阿尔弗瑞德·罗森伯的《2000年的神话》中所阐释的、国家社会主义的反国际主义的意识形态理想地一致。20年代早期的右翼反相对论的松散群体，包括勒纳德、斯塔克和格尔克等有名的成员。其中两



名诺贝尔奖得主早期转向了纳粹党。虽然斯塔克 1930 年，勒纳德 1937 年才入党，但他们在早几年就已经致力于希特勒主义的事业了。1924 年，他俩共同撰文称赞希特勒及其盟友，把他们描绘成“上帝从种族更纯、人民更伟大、心灵更少被欺骗的旧时代中带来的赐品”。（Hentschel 1996，100）他们曾因此文被德国物理学共同体所驱逐，但 1933 年以后，他们发现自己处于权势的一边了，并准备进行报复。由于勒纳德年纪大了，他于 1932 年退休，主要在意识形态战线发挥作用，而较年轻的斯塔克则可在政治上出力，寻求夺取对于德国物理学组织的控制权。

取代被蔑视的犹太量子-相对论教条，勒纳德、斯塔克及其盟友想要装备什么物理学呢？首先，它绝不是以一种一致的或纲领的方式表述的，实际上，它搓和成一种紧致的世界观。它未物质化为一种科学的实践。北欧日耳曼物理学的特征是反对现代物理学及那些作为特征的复杂的数学手段、缺乏可视性、反直观的结论，以及对牛顿、法拉第和亥姆霍兹的经典世界观的不敬。基本上，北欧日耳曼物理学是反现代并浪漫主义的，它渴望回复到那种基于实验、跟直觉一致、简单化、理论可理解的物理学。跟分裂物理学的专业化相反，他们提倡自然的整体观。但那样一来，北欧日耳曼物理学当然就是公开的种族主义，宣称一切坚实的物理学来自北欧日耳曼人（虽然常常被犹太人所剽窃），而犹太血统的物理学家擅长贫瘠的理论化，诸如相对论。勒纳德之类的人相信物理学宗旨是寻觅真理，而真理只能通过实验与关于实在的心灵形象的结合才能获得。这类形象的最重要者就是以太，许多北欧日耳曼物理学家宣称，它不仅是形象，而是一种实在。他们以一种简单化并浪漫主义的方式坚持：只有北欧日耳曼物理学家，通过细心的实验与观察才能建立与自然的对话；自然会进入对话，并回答所提出的问题。但是，先进的理论不会把你带到那里。如勒纳德的学生阿尔范斯·比尔所说的，“物理问题的极

大的数学处理无疑是犹太人精神所产生的。……正如他〔犹太人〕在别处——例如在商务中——在他的眼前总是只有数字的信贷计算，所以，那必定是一种典型的种族特征，甚至在物理学中他把数学公式放在前景。”（Beyerchen 1977, 132）

北欧日耳曼物理学也可称为纳粹物理学，它的观念受纳粹官员，如罗森伯的相当有力的支持。而这种支持确保了斯塔克在物理学中的权力基础，并且，在一段时期，北欧日耳曼物理学显得是对常规物理学的一种威胁。认同勒纳德与斯塔克的物理学家人数很少，总共不到 30 人。但由于政治环境以及在学生中有大批趸，所以，他们的影响相对大于其数量。1939 年，当索末菲尔德任慕尼黑的主席问题被最后解决时，他们到达了一个暂时的巅峰。索末菲尔德曾要求海森伯追随他，北欧日耳曼物理学家们发动了一场反对两位量子理论家的刻毒的运动，并控告海森伯是“白色犹太人”。虽然海森伯恢复了名誉，但该运动达到了它的目的。威廉·缪勒，一位虔诚的纳粹党员和毫无现代物理学知识的反相对论者，被任命为慕尼黑的理论物理学教授。如果它不是真实的，如果背景不是悲惨的，它可能是一种玩笑。到 1939 年底，6 名北欧日耳曼物理学家被任命为大学或技术学院的教授（在慕尼黑、海德堡、卡尔斯鲁德和斯太特嘎特）。

尽管一些偶然的胜利，叫嚣的北欧日耳曼物理学家的影响是有限的和短命的。绝大多数德国物理学家，甚至在同情纳粹事业的人中间，认为勒纳德和斯塔克的观念是站不住脚的、可笑的和危险的。如约丹虽支持新政权并于 1933 年加入纳粹党，但跟否认 20 年来取得的理论物理学的进步的奇怪企图没有干系。北欧日耳曼物理学简直无法取代爱因斯坦、玻尔和海森伯的物理学，并且，实际上，德国许多大学的物理教学没有受到企图禁止相对论的影响，相对论在教科书和课堂中继续存在，只是爱因斯坦的名字常被删去。1940 年以后，当斯塔克及其追随者失去其大量政



治支持之后，他们的运动开始瓦解；3年后，实际上停止存在了。或许，北欧日耳曼物理学的主要效果是，它对于像爱因斯坦、玻尔和海森伯一样的主流物理学家的冲击。这些人强烈地感觉到斯塔克之流是在摧毁德国物理学，跟魔鬼的斗争是不得已的。对他们来说，这是他们留在德国并与纳粹当局合作的一个积极的理由。他们没有意识到：在第三帝国，发生着比相对无害的北欧日耳曼物理学更恶劣的事态。

墨索里尼时期的意大利物理学

1922年，墨索里尼取得政权；3年以后，意大利变成了一个在独裁者领导下的法西斯专政。当然，意大利物理学没有什么可吹嘘的。无人可取代老一辈实验家奥古斯托·里奇的声望。在理论方面，情况更糟。曾在物理学上占有重要地位的意大利，似乎变成了一潭死水。但随后事态有了变化。在1925~1938年，在法西斯的年代里，意大利物理学以最令人瞩目的方式繁荣着。这个国家成了欧洲现代物理学最先进的国家之一。在这一过程中，中心人物是费米，他于1926年成了罗马的理论物理学教授，当时他只有25岁。在30年代早期，费米组织了他的年轻的实验与理论物理学家团队，这包括埃多阿多·阿马尔迪、弗朗科·拉瑟蒂、布鲁诺·庞特科夫、埃米里欧·瑟格瑞和其他人。费米和他的团队改变了意大利物理学以及实际上世界物理学的面貌，但他们不是独自的。当费米在罗马专注于核物理学的同时，佛罗伦萨一批强大的年轻物理学家对于宇宙射线和相关领域的研究做出了重要的贡献。佛罗伦萨团队的主要人物是布鲁诺·罗西、吉尔伯托·伯纳狄尼、古瑟佩·奥克希阿里尼和金利欧·拉卡。他们全都跟在罗马的同事们关系密切。意大利物理学家在观点与实践上是强烈国际性的，常在外国度过很长的时间。他们所代表的物理

学似乎没有引起跟政府的任何麻烦，或跟法西斯倾向的哲学家的任何争论。

费米与他大多数同事全心贯注于物理学，对政治不太感兴趣。虽然费米基本上是反政治的，然而，他清楚地知道怎样操控罗马科学的政治圈子。1929年费米被任命为新建的意大利科学院唯一一位物理学院士。这机构是墨索里尼建立起来取代旧的、有名的林塞科学院的。墨索里尼怀疑原科学院的成员是仇恨法西斯的。作为意大利科学院的成员，费米被授予科学院的法西斯制服，并赠予了“卓越的”头衔。他也是国家研究协会的成员。不管喜欢与不喜欢，费米是意大利政治的一部分。他在罗马的研究团队事实上是受到法西斯政权的保护的。费米从来都不是墨索里尼国家的积极支持者，但也不是一名反法西斯者。

尽管意大利法西斯与国家社会主义的意识形态相似，墨索里尼并不喜欢德国改为第三帝国。许多意大利物理学家决定冷处理跟一个解雇犹太同事的国家的关系。这就是费米决定把中子诱发核反应的论文在英国发表，而不像以往情况下自然在德国发表的背景。当时，罗马与佛罗伦萨的物理学家通常转向英美，而背向德国。有一段时间，意大利物理学继续繁荣，没有受到德国严峻局势的干扰。可是，从1937年起，墨索里尼的意大利和希特勒的德国越走越近，德国成了政治、军事和经济伙伴关系中的老大。结果是，1938年意大利法西斯政府引入了效法臭名昭著的纽伦堡法的种族法令。后果之一是：犹太学者和科学家从意大利大学中被辞退，而且，意大利犹太人的生活变得普遍困难了。费米因其妻子是犹太人受到了根本性影响，另外，极端法西斯分子公开控告他“把物理研究所变成一个犹太人的集会地”（Segré 1970, 98）。他决定离开祖国，而且，正好有一个机会，即他于1938年12月10日接受了诺贝尔奖。他不从斯德哥尔摩返回罗马，而是携同妻子去到了美国。几个意大利物理学家离开了这个



国家，包括拉瑟蒂、阿马尔迪和瑟格瑞。罗西，犹太人，面临 5 年前贝特在德国的相同处境，他设法得到了一份护照去到哥本哈根，在那里玻尔经济上资助他，帮他找到一个暂时的工作。布莱克特邀请他去曼彻斯特作一名科学与训练保护协会的研究员，1939 年 6 月，罗西步费米的后尘去到了芝加哥。

物理学，辩证唯物主义

北欧日耳曼物理学（以及在数学、化学与生物学中的同类新物种）的一个软弱点就是，它不能诉诸于国家社会主义的、可接受的哲学基础。简直就没有这样的基础。国家社会主义是建立在行动与情绪上，而不是建立在严谨的观念的基础之上的。这跟前苏联的境况不同的。在那里，政权的意识形态是以马克思、恩格斯和列宁的社会主义主题著作为基础的。哲学家发现：从官方马克思主义哲学来分析科学，是很重要的。这哲学就是从恩格斯与列宁的著作中萃取的辩证唯物主义。马克思主义的热心者寻找激励一种“无产阶级的科学”。它在方法目的和进路上不同于资产阶级科学。这运动具有相当的哲学与政治意义，但不能说服物理学家按更加无产阶级化的方向去改变他们的科学。一般地，前苏联科学家中政治活动家极少。按照 1930 年的一份材料，前苏联有 25000 名“科学工作者”，其中有 1000 名物理学家，只有 44 名党员。

在 20 年代的大多数年份，党的哲学对于物理学家没有形成严重冲击。但在 30 年代争论加剧，特别是关于量子力学的解释问题。从政权意识来看，把它的观点强加于物理学家，不是一种如物理学家与哲学家之间，以及在某些情况下物理学家与物理学家之间的冲突，而是严重得多的意识形态的分歧。由于某些哲学家把自己视为马克思列宁主义的智力卫士，他们在政治上的声音

比他们在正常的民主环境中的作为更重要。如果能够认定一定的物理理论或它的一定解释是“唯心的”、“主观的”或“马赫主义的”，那么，它可以导致一种潜在的危險局面。例如，1939年哲学家亚历山大·马克西莫夫宣称：爱因斯坦、薛定谔、玻尔、狄拉克和海森伯都是“唯心的马赫主义变种”，他们的物理学观点在意识形态上是不可接受的。他宣布：“科学为布尔什维克而奋斗，就是为科学的基本重构而奋斗。”（Vucinich 1980, 240）党的哲学家试图使物理学家卷入意识形态的讨论，使其认识自己的错误，但他们是很不成功的。许多物理学家简直不理睬哲学家，远离那些涉及物理学与马克思主义关系的问题。卷入这些问题可能导致许多困难，毕竟，物理学有更多比哲学值得关注的问题。另外也有人迎接挑战，并坚持认为，要批评物理学，就必须理解物理学。他们兴高采烈地注意到，哲学家并不理解。或者，他们坚持在马克思列宁主义原理与现代对相对论与量子物理学的理解之间事实上不存在矛盾。1934年，阿布拉姆·依奥菲抗议：给认同玻尔和哥本哈根理论的代表人物贴上“唯心主义的”标签是没有根据的。恰恰相反，他宣称：西方物理学家所到达的令人诧异的洞识，等于是“辩证唯物主义的证实与丰富”。（Vucinich 1980, 240）

争论不单纯发生在狂热的哲学家与理性的物理学家之间。前苏联有些物理学家的科学观不会比德国的勒纳德更现代。他们坚持一种牛顿世界观，支持以太的存在和拒绝相对论与量子力学。在少数的保守派中有克里门特·提米里阿哲夫，莫斯科国立大学的物理教授，和弗拉吉米尔·米特科维奇，一位电器技术专家。这些人以及其他的“机械论者”控告诸如弗伦克尔、瓦维洛夫、塔姆和伊奥菲等进步物理学家鼓吹唯心论、蒙昧主义、教士主义。跟在德国发生事态一样，对于“新物理学”的攻击也包括反亲犹太人主义。争论的另一个特点是地域性。列宁格勒所起的作



用跟柏林所起的作用相似。列宁格勒是量子与相对论理论家的据点。列宁格勒物理-技术研究所在共产主义强硬派中有个不好的名声，如同它在国际物理学中有个好名声一样。这是列宁格勒作为前苏联物理学中心的重要性下降的理由之一。30年代中期，科学院由列宁格勒搬到莫斯科，许多物理机构开始向莫斯科集中。

虽然有些哲学家与物理学家攻击物理学理论本身，但30年代大多数讨论只涉及方法论与认识论问题。人们广泛地（但不是全部）认为：相对论与量子理论基本上是正确的；试图创造一种共产主义或无产阶级的物理学是无力的，不能当真。然而，解释与方法问题是政治敏感问题，不可能局限于纯学术水平。许多苏联物理学家领导层坚持哥本哈根学派，并认为——的确，必须认为——这些观点可以被弄得跟辩证唯物主义相和谐。这群物理学家包括杰出的理论家，如福克、朗道、塔姆、弗伦克尔和布洛恩斯坦。少数物理学家与大多数哲学家激烈分歧。K·V·尼可尔斯基，一位物理学家，攻击玻尔-海森伯的立场，他发现他们是“完全跟理论物理中的进步观念不协调的”（Vucinich 1980, 245）。在30年代末期的攻击言论中，把一个物理学家标榜为“唯心主义者”，跟北欧日耳曼物理学家把他们的敌人标榜为“白色犹太人”，何等地相似。事实上，伊奥菲讽刺地注意到：马克西莫夫的立场包括其对爱因斯坦与玻尔的刻毒攻击，不只是表面上与勒纳德和斯塔克的立场相似。这一点被卓越的理论家雅可夫·弗伦克尔所指出。他不尊重辩证唯物主义，对于恩格斯与列宁的物理学具有假定的洞识。在1937年致党的理论期刊《在马克思主义的旗帜下》的一封信中，他注意到：马克西莫夫一伙的观点出奇地相似于以斯塔克为首的反动物理学家一伙。……在他们处理现代物理学中，米特科维奇、卡斯特林以及跟他们一起的马克西莫夫，跟斯塔克、赫尔克和德国蒙昧主义的其他代表的差别，只是把“犹太人的”换成了“唯心主义的”（Frenkel 1997, 215）。

弗伦克尔的信件没有发表。

跟德国的情形一样，业已确立的相对论成了某些哲学家用于政治批判的靶子。他们指责爱因斯坦的物理学几何化企图以及对强调意识在物理理论中的作用的挑衅。“相对论并未深入物理现象的深层，”恩斯特·科尔曼 1934 年写道，“所有想在连续空间几何学中建立物理学的努力，注定要失败。这些努力浸透了无根基的、形而上学的、被许多理论物理学家的唯心主义所激励的夸张。”（Vucinich 1980, 249）大多数苏联的批判比德国的批判更公开与更激进。在德国的批判中，全盘否认相对论的有效性，很少把狭义与广义相对论区别开来。总体上，30 年代前苏联哲学家与物理学家之间的争论跟德国发生的具有不同的性质。物理学家与开明哲学家不会遇到因反对党哲学家的攻击而辩护自己观点的麻烦，也不存在要创立一个特别的马克思主义物理学。以应对荒诞的北欧日耳曼物理学的沉重压力。

争论不受严重意识形态的约束、以相对自由的方式发生的主要原因是，它是两派学者之间的争论，双方观点都未被政治当局认可。第二次世界大战以后，形势变化了。这时前苏联知识分子经历了一场极端严峻意识形态气氛，量子力学的解释问题变成了政治-意识形态的一部分。1948 ~ 1951 年，物理学被极大地政治化，还开展了一场反对“反动的爱因斯坦主义”运动。但即使那时，充其量是一个什么是正确的物理哲学观的争论。可怖的李森科主义情况没有在物理学中形成气候。

这并不意味着苏联物理学共同体就跟斯大林政权和平共处了。在 1933 年前后，苏联的气氛被不健康的排外、猜疑、献媚、惧怕秘密警察的重重迷雾所笼罩。虽然前苏联物理学家早期就是国际物理生活的积极参加者，德国物理期刊的主要撰稿者，他们现在被迫陷入日益孤立之中。1932 年创办的期刊《苏联的物理杂志》，为了缓解苏联物理学家的孤立，也偶尔让外国人刊登论文。



《杂志》是一种奇妙的组合，内容涵盖：披上符合官方的科学哲学外衣技术与军事物理，以及量子场论和主流物理学其他领域的高质量的技术论文。

第十七章 | 人才流出与人才流入

30 年代的美国物理学

从 20 世纪 20 年代末起，美国物理学经历了一个在质与量两方面急速发展的时期。新的学院、系科和研究生规划被确立，常常受到大的私人基金的经济资助。其中最重要的是普通教育局 (GEB)，一个由洛克菲勒基金建立的慈善机构。它的运作限于美国。在 1925 ~ 1932 年，普通教育局以巨资 1900 万美元支持了美国大多数大学。

金钱是美国进步的一个重要因素，但不是唯一因素。另一个因素是美国物理学（以及其他科学）的领导人致力于国际合作与竞争。按传统的办法是派美国科学家去到欧洲，但在 20 年代流动开始逆转，先是邀请几个年轻的欧洲物理学家来美国大学任教，创办最优秀的学术讨论会与夏季讲习班。从 1927 年开始，密立根大学举办的年度夏季讲习班，是其中最重要的一个，而它仅是吸引欧洲来访者的几所学院中的一个。气势恢宏的物理学规划在美国许多大学中发展着，其中最重要的是：普林斯顿、芝加哥、贝克莱的加利福尼亚大学和加利福尼亚工学院。

美国的物理中心日益增长的吸引力，可以从洛克菲勒基金国



际教育局 (IEB) 接受博士后研究员的接纳机构的选择看出。IEB 作为 GEB 在欧洲的附属机构在欧洲运作；跟 GEB 一样，IEB 是洛克菲勒基金建立的。在 1924 ~ 1930 年，IEB 接受 135 位欧洲物理学家申请出国作博士后研究，44 人选择去美国。最有吸引力的欧洲国家是德国与英国，分别有 26 与 25 名物理研究员；16 人选择去丹麦，这选择反映玻尔研究所的重要性。到 30 年代早期，美国物理学进步显著，可以跟欧洲任何一个国家相竞争了。1933 年，希特勒在德国夺得政权的 5 个月后，美国物理学会在芝加哥召开了它的年会，约翰·斯拉特跟玻尔、科克科罗夫特和费米等欧洲物理显赫出席了会议。斯拉特回忆说，给他印象最深的是：“应邀发言的精彩，远不如从事项目研究的年轻美国工作者，这是关于其极重要的研究的极具高质量的发言。这是第一次，欧洲物理学家在这里学到的跟讲授的一样多。” (Weiner 1969, 201)

其实，在芝加哥会议时期，美国物理学面临着由大萧条所引起的巨大麻烦。经济危机对美国科学的全面袭击只是滞后了几年，影响时间并不太长。但当萧条于 1933 年袭击美国时，冲击是严重的。财经支持严重削减，员工薪水大打折扣，新的博士几乎找不到工作。然而，尽管麻烦重重，危机时期并未导致博士生人数减少。1931 年，最后一个好年，美国基金捐赠总计 500 万美元支持自然科学研究；1934 年基金财经支持削减至 200 万美元。所有的物理研究所都受影响。国家标准局或许是最残酷的。1932 ~ 1934 年，运作这个机构的经费，政府雇用物理学家被削减 70% 以上工业实验室也不能幸免。到 1933 年，通用电器裁员 50%，AT&T (连同其实验员工) 几乎裁员 40%。除了财经困难，美国物理学领导人还需担心公众心目中的科学形象。它从传统的正面形象转变成被批评指责对象，或甚至转变成负面形象。在 30 年代早期，美国社会存在一种非组织的反科学运动，质疑科学行为的理论基础。它是由异端的，不同的阶层、不协调的意识和各种

不满情绪的合成物。

有些人文主义者哀痛科学缺乏价值观，认为科学不能提供现代人最需要的东西：精神的需要与道德的引导。他们提议对科学作延期付偿，或强烈地削减科研经费。这态度既不是新招，也不仅限于美国地区。1927年，瑞彭主教在英国的一个公开集会上传教，他说，“冒着被某些听众处以私刑的风险，我提出这样的观点：如果每个物理与化学实验室关闭10年，将运转它们的资金用于病人及其机智已失去凝聚力的艺术，并寻找人类生活天平两端平衡的公式，那么，科学家之外的人类幸福的总和将不一定会减少。”（Bernal 1939, 2）其他的批评者相信：科学技术应该为大批的失业而受到责备。因为难道不是机器与自动化摧毁了比它们所创造的、更多的工作吗？难道奴役性劳动不是科学的产品吗？批评者还认为：科学的缺点不在于它产生技术发明，而在于它没有产生足够多的发明，没有产生使一般公民获利的那种发明。与其把钱用在深奥而无用的主题上（诸如相对论），物理学家不如解决人民的基本需要。如一个批评者所指出的，“如现在这样，用很少的脑子关注于中子藉以贯穿原子核的速度……穷人的住房代价可能削减一半。”（Kevles 1987, 247）这种批评跟前苏联的“无产阶级科学”运动提出的主张同出一辙。

反科学的态度或许不是很广泛的，但它被科学家共同体的领导所严重关注。他们担心当萧条停止之后它可能会伤及更进一步的前景。虽然大的慈善机构不是反科学的，它们受到一般诉诸于更人文和财富定向科学的影响。洛克菲勒基金决定把它的优先领域，从更基本的物理与化学转向直接涉及人的科学，诸如生物学，心理学和社会科学，其主要原因就在这里。

“当关于物理学的贡献已超越人们所能承受的信念时，不安，甚至警告就在增长着。”洛克菲勒基金主席1936年写道，“毫无疑问，在我们急速进步的科学与我们停滞发展的伦理之间，发展



着一个严重的滞后。”(Kevles 1987, 249) 洛克菲勒政策的移位对于欧洲与美国的物理学家来说, 是一个严重的事态。只提两个例子。加州工学院的密立根和哥本哈根的玻尔意识到他们只能在生物领域内才能得到物理课题基金。结果是: 为了得到资金, 他们强辩说, 虽然他们在宇宙射线与核反应的研究是纯物理学的, 但仍跟生物问题有关。

还有, 1935 年, 哈佛大学的埃德文·肯布尔把新物理博士的工作处境说成是一场“噩梦”。但在当时, 事态已开始改善。复苏时期迅速来到, 美国科学不再严重地感受到大萧条的后果了。物理学家的雇佣状态在改进, 物理学生人数迅速增长。1931 ~ 1940 年, 1 400 名物理学博士被授予学位。在接下来的 10 年里, 这数字翻了一番。到 1940 年近 200 名研究生在美国各大学被授予物理博士学位(图 2.1)。美国物理学会会员从 1920 年约 1 300 人直线增加到 20 年后的 3 700 人。到 1941 年, 在美国工作的物理学家人数达到 4 600 人——差不多是前苏联的 5 倍。工业实验室的数目从 1920 年约 300 个上升到 1 940 个。从更开阔的视野看, 萧条的年岁只是美国物理学的生长大趋势中的一个小挫折。美国物理学的这种生长与活力, 是美国有能力吸收 30 年代来美国避难的欧洲物理学家的一个实质因素。

许多物理学家受雇于工业, 估计 30 年代末为 1 800 人。他们日益感到物理学术文化与自己的隔膜, 决定不参加美国物理学学会。量子力学不仅强化了理论, 而且, 疏离了一部分物理学共同体。兼顾应用与纯物理学的保护机构, 美国物理研究所于 1931 年创立, 致使受威胁的分裂得以避免。《物理评论》仍然是美国学术物理学以及不久后也是世界物理学的旗舰。工业实验室继续向该期刊供稿, 但比 20 年代少一些。他们现在许多论文刊载在《应用物理期刊》上, 这是美国物理学会于 1931 年创办的。在英国和美国的纯物理学期刊中, 根据论文来源分布的数据可显示纯

理论和应用科学的份额。这些数字虽不具直接可比性，但它们显示了工业物理学家的论文 20 世纪 30 年代在《物理评论》所占份额的下降，这种下降在英国更显著。虽在英国 30 年代中期还不是下降最严重时期。在当时，《物理评论》发表的论文主要由大学主宰，跟英国的情形一样。

表 17.1 英国与美国领导的物理学术期刊中按来源的论文分布

	来源及百分比			
	论文数	学术	工业	政府
美国（《物理评论》）				
1930 年	311	88.7	7.7	3.5
1935 年	282	96.5	3.2	0.4
1940 年	290	93.4	5.5	1.0
英国（《哲学杂志》与《伦敦皇家学会进展》）				
1932 年	338	92.9	0.9	6.2
1936 年	301	93.7	2.3	4.0

注：《物理评论》只收录源于美国机构的论文，占总论文的 93%。

来源：基于 Weart 1979a and Bernal 1939 的资料。

科学是否存在国家风格问题，是历史学家与哲学家争论不休的一个议题。对于 20 ~ 30 年代的许多欧洲访问物理学家来说，美国物理学似乎明显存在一种不同于欧洲的风格。例如，在美国系统中，物理学与工业、实验与理论、物理学与邻近科学（如化学与天文学）之间的界限，不是那么分明的。美国人较少搞形式主义，共事的一帮人没有严格的等级。还有，美国人似乎更愿意把他们的工作转化为专利，而且，科学商业化很流行。他们不怕公开性，并主动让出版单位对他们的工作感兴趣，以便从中获得好处。1934 年，美国建立了国家科学作家联合会，美国物理学会



为物理学家发动了一场宣传。当美国科学进步联合会召开它的1935年年会时，至少有16位物理学家被引荐给大会。美国物理学家与报告人联手向公众推销物理学，这是在欧洲闻所未闻的现象。但是，欧洲人最关注的是美国物理学家的工作节奏——他们甚至整个周末在实验室工作——以及他们对于大机器的激情。按照弗朗兹·西门，一位1932年访问美国的德国低温物理学家的说法，“美国人工作似乎很出色，只是他们明显地坚持尽可能大地做每样东西。”一位比利时物理学家对“实验室的丰富性”印象深刻，并被“‘率先’创建文明”所激励（Heilbron and Seidel 1989, 36）。对许多欧洲人——访问者或移民者——来说，美国人对大机器的偏爱是一种智力不成熟的表现。美国实验家是在做物理还是做工程？他们有时间与能力思考吗？沃尔特·埃尔萨瑟评论道：“美国人是最粗糙类型的人，非常好的工人，但头脑没多少主意……他们的数字是凭印象。但是，关于他们的技术能力则不必太担心。”（Heilbron and Seidel 1989, 36）

智力移民

由于欧洲政治动乱，大批物理学家被解雇，生存受到威胁，或者，因其他原因决定不能再留在他们工作过的国家里（见第十六章）。大多数移民物理学家是德国犹太人，但在欧洲移民中也有非犹太人和非德国人。就他们被解雇或被迫离开祖国而言，他们并非全是难民。而且，有些侨民在1933年以前还未被解雇或驱逐时，就主动来到了他们的新的国家。可是，事实上他们仍是难民。他们被迫漂泊，或更糟糕的是，当他们刚出国门就多半不可能回去了，才决定离开祖国的。例如，维格纳和冯诺意曼1930年来到美国，一半工作在美国，另一半工作在柏林；确切意义上他们不是难民，但1933年以后，他们在柏林的工作被中止了，

也就没办法回德国了。乔治·赫维西，匈牙利犹太血统的化学家与物理学家，是弗莱堡大学一名教授，没有被解雇，原先想呆在德国；但1933年5月见证了第一波解雇犹太人浪潮之后，他觉得留下来不安全，于是远走哥本哈根。

不少难民物理学家原先侨居邻国，如丹麦、瑞士、荷兰或法国。在大多数情形中，他们留在那里是暂时的，然后就去英国或美国；或者，在许多情形中，先到英国，后到美国。赫维西1943年待在丹麦，然后去到瑞典，是一个例外。一小群移居的物理学家与学者，包括物理学家理查德·冯米瑟斯和天文学家埃尔文·弗伦德利希，去新近闻名的伊斯坦布尔大学，但在大多数情况下是去美国或别处。伊斯坦布尔大学的条件不能令人满意，而且，还得用土语教学。还有，大多数曾希望在前苏联获得永久难民权的物理学家都大失所望。1937年以后，他们被解雇、驱逐或投入监狱。移居犹太科学家的另一个可能性是耶路撒冷的希伯来大学，那里犹太复国主义者（爱因斯坦属于其列）寻求建立一个强大的科学机构。虽然在1933~1945年，大约有30个国家接纳了移民科学家。他们的最大接纳国是英国和美国。表17.2列出了一些代表性的物理学家侨居这两个国家的情况。

许多国家与国际学术组织对于德国解雇学者与压制学术自由很快做出反应。可是，在几年里，反应有一种趋势，就是力图避免作政治批评，希望以一种相当抽象的方式处理原则问题。关于知识分子的自由，以及科学的国际性与中立性的庄重声明是姿态性的，直接的行动和批评则较少。这种公开批评的声音主要由科学家本身发出。例如，1934年，一群杰出的欧洲学者，包括欧内斯特·卢瑟福、保尔·朗之万和简·佩兰谴责他们认为德国对科学的误用，即“准确的科学被公开降格为钻营战争工业”以及“只有那些可能带来直接的技术进步的考察才会被人们赞许”（Weiner 1969, 209）。当然，在数年之后，英国和美国的物理学



表 17.2 欧洲物理学侨民的归宿地

英国	美国	经由英国到美国
M·玻恩*(G)	V·巴格曼(G)	G·贝克(A)
P·P·埃沃尔德(G)	F·布洛赫*(S)	H·贝特*(G)
H·弗里德里奇(G)	L·布里渊(F)	F·埃伦哈夫特(A)
R·弗瑟(G)	P·德拜†(N)	O·弗里什(A)
D·卡伯*(H)	M·德尔布鲁克*(G)	K·弗奇斯(G)
W·海特勒(G)	A·爱因斯坦†(G)	G·赫兹†(G)
N·克默(G)	W·埃尔萨瑟(G)	F·伦敦(G)
N·克蒂(H)	E·费米†(I)	E·拉宾诺维奇(G)
K·门德尔松(G)	J·弗兰克†(G)	O·斯特恩*(G)
E·薛定谔†(A)	G·赫兹伯格(G)	L·斯兹纳德(H)
F·西门(G)	R·拉登伯格(G)	E·泰勒(G)
	A·兰德(G)	
	E·瑟格瑞*(I)	
	L·提斯扎(H)	
	V·维斯科普夫(G)	
	E·维格纳(H)	

注：带剑号的人是侨居前的诺贝尔奖得主；带星号的是侨居后的诺贝尔奖得主。名后的字母是侨居时的国籍：A = 奥地利；F = 法国；G = 德国；H = 匈牙利；I = 意大利；N = 丹麦；S = 瑞士。

家本身也积极从事“降格”精密科学的事业，为军事服务。另一份有 1000 名美国科学家签名的宣言，谴责北欧日耳曼物理学运动是“对一切理论物理学，以及按其蕴涵是对一般科学理论的攻击”（Weiner 1969, 209）。这是一个相当不完全的批评，几乎没有什么科学家和组织能够做出改变德国局面的事情来。他们所能

做的，是提供金钱和工作岗位来帮助他们的不幸难民同事。在这方面，物理学家的反应是迅速而有效的。实际证明“国际物理学共同体”不只是一个褒奖词。1933~1934年，德国境外物理学家成立了几个援助组织，其中多数是由个别物理学家倡议，没有得到政府机构的官方支持下成立的。他们收到个人的赠品和私人基金的赞助。许多科学家保证将其薪金的1%~3%献给崇高的事业。1933年德国难民学者组织了“境外德国科学家应急协会”，先设在苏黎世，后在伦敦，受理来自英国社会有识之士的帮助。

在英国，1933年5月建立了“学术援助协会”（AAC），它是一个帮助难民科学家寻找临时工作岗位的合作机构。其目的是“捍卫学术自由原则，帮助那些因宗教、种族或政见不同而不能在他们自己的国家继续其工作的学者与科学家”（Weiner 1969, 211）。AAC后来更名为“捍卫科学与学术协会”，它的第一任主席是卢瑟福，协会最积极的支持者之一是利奥·斯兹纳德，一位在希特勒掌握政权之后从德国迁居英国的匈牙利-犹太血统的物理学家。根据一份统计材料，67位欧洲大陆的物理学家来到英国，其中几乎一半重新移民到其他国家，大多数是美国。另一份统计材料显示：37%的移民科学家与工程师先流亡到英国，将美国做第一首选的百分比低一点，为35%。美国大学的更大与更动态的体系，最适合于吸收侨民，其中57%在美国安顿下来，只有11%留在英国。这符合“学术援助协会”的政策。它安排短期的支持，并公开鼓动难民科学家进一步横渡大西洋去寻找永久的岗位。AAC把自己说成是“票据交易所”，并用不太肯定的话说“美国是最终的国度”（Hoch 1983, 230）。

在英国的大多数侨民靠临时的研究费生活，在战争爆发前，只有很少的人得到永久的学术岗位。移民到英国是很困难的，只有有限的工作岗位，或许，愿意在英国找工作的人也很少。1933年，当德国物理学家乔治·雅菲试图在英国找到一份工作时，他



回忆说：“我在那里有一种强烈的感觉，[大学]学院已经满员，不再登记申请了。无疑，这种感觉主要是恐惧这种允诺最终可能对于他们自己的研究生和教师的已经茫然的雇佣前景产生灾难性影响。”（Rider 1984, 131）甚至著名的物理学家都难以找到永久性的工作。1933年，马克思·玻恩收到去剑桥大学的邀请，工作期限不确定，所以，当1936年爱丁顿大学提供他自然哲学（理论物理学）的教授岗位时，他的心情无疑大为舒展。

1933年庞大的帝国化学工业集团（ICI）启动了一个安置失业物理学家与化学家的规划，大大地缓解了英国的困难处境。ICI的赞助项中包含有为具有一项可为公司所用的专长的科学家提供大量的2~3年期的研究费。受到这份赞助的人中有：薛定谔、弗朗兹·西门和弗里兹·伦敦。ICI慷慨行为的一个显著结果是低温物理学成了英国的特长。这主要是受益于科特·门德尔松和西门等杰出难民物理学家的的工作。战争宣布时，许多德国与奥地利难民作为敌国异己被扣留在英国，但有些被驱逐到加拿大，其中有年轻的奥地利物理学家沃尔特·科恩和厄曼·邦迪。科恩到了美国，在那里成了一名重要的固体物理学理论家，而邦迪返回到英国，开始其在宇宙学与相对论的出色生涯。

美国的援助组织效法英国的做法，建立了“援助失业德国学者的应急委员会”。应急委员会一般向各大学缺乏岗位基金的难民科学家提供研究经费。有些钱来自于美国或其他慈善机构的个人捐赠。洛克菲勒基金建立了悬置学者特别研究基金。在1933~1939年，该基金提供了77.5万美元的补助金。美国人敏感地意识到他们大学的经济状况紧张，以及外国科学家与寻找工作的美国青年人之间的冲突。为此，应急委员会的支持限于“已有名望的成熟学者”，而很可能跟美国申请者竞争的青年科学家只能得到较低的优先权。在美国各学校得到工作岗位的大多数欧洲大陆物理学家都是30~40岁的人。

欧洲难民物理学家必须面对的一个问题是，在美国许多大学存在的反亲犹太人主义。这不是一种新现象，当然也不是仅对于欧洲难民来的。1937年卡姆伯推荐尤金·菲恩伯格，一名卓越的美国犹太物理学家，在哈佛之外找一份工作。菲恩伯格是在肯布尔指导下在哈佛完成博士学位的。肯布尔在推荐信中这样写道：“他是一个又高又瘦的得克萨斯人，相貌和举止都不像是一个纽约希伯来人。”推荐信无济于事，北卡罗来纳大学告诉肯布尔：“对我们来说，那实际上是不可能的，聘用一个希伯来血统的人……在一个南方的学校里。”（Kevles 1987, 279）詹姆斯·弗朗克，难民中的诺贝尔奖得主，抱怨美国日益增长的反亲犹太人主义，他觉得对犹太人的仇恨程度不亚于1933年以前德国国内的程度。

尽管难民物理学家来到美国时面对许多问题，但是，在1933~1934年从欧洲来到美国的100多名物理学家中，大多数人跟美国同化得特别的好。其主要原因是：美国物理学经历了萧条之后的复苏，美国各物理系科被置于一个比欧洲大多数的物理系科更好的经济状态之中。许多移民者是理论家，既有高超的德国理论物理水准，又习惯于欧洲的、理论家与实验家的严格分离。当他们来到美国后，他们一方面提高了美国人对于理论物理的兴趣与水准，另一方面，他们也很快地学会了欣赏许多美国大学特有的、理论家与实验家界线不明的状况。汉斯·贝特，最重要的难民物理学家之一，发现康纳尔大学的氛围比欧洲的大学更加激发人们进取。他回忆，在欧洲，“习惯上，教授讲课、谈话、板书，然后离去。学生只是听讲与设法理解……这里，只要学生觉得有兴趣，他们就会提问。我认为这样要好得多。”（Weiner 1969, 223）美国给予贝特很多，他也给予美国很多。斯坦利·利文斯顿，曾跟贝特工作过一段时间，回忆说：“他〔贝特〕给我关于物理学基础以及在核物理学中正在发生着什么的一种感觉。……我学到



了许多新的概念，如磁矩、量子特性等，那是在劳伦斯〔在贝克莱〕从没听说过的，那是一个不同的环境。我现在跟着一位学者，印象真的深刻。”（Stuewer 1984, 34）

美国物理学变得壮大坚实是由于欧洲侨民的流入，那是无可置疑的。特别在许多理论领域，如量子电动力学、核物理学和固体理论，侨民是无价之宝。只有在美国环境中，由于那里在机构与智力和实验与理论上已经有了坚实的基础，这些学科才能繁荣起来。跟人们常以为的相反，美国并不只是因为人才的流入才变为物理学的世界领导国家的。1936年，《新闻周刊》骄傲地宣布“美国领导着世界的物理科学”。欧洲的难民浪潮虽进一步增强了这一领导权，但它主要是被美国物理学家以及国家在高等教育和科学机构中的非凡成就所创造的。侨民受到美国大学的欢迎，部分是由于一般的人道情感，部分是因为美国物理学家和科学管理人员认识到他们将会对研究做出有价值的贡献。就美国想要广纳最好人才的动机而言，这些动机是非政治的。但当战争来到时，它被认为是一份额外的红利。在1941年6月，美国仍是一个形式的中立国时，这种智力移民的战略结果，曾被一位叫做科特尔的教授，在一封致应急委员会主席斯蒂芬·杜冈的信中指出。他坚持：“如果我们能够把他们的战略人才弄出1 000人，他们是自然科学领域的领导人，那么，我们就可以削减欧洲大陆的技术成就，从而损害西班牙与葡萄牙的技术成就的基础。并且，从长远来看，这可以更廉价地赢得为民主的战斗，而且，结果将比我们诉诸防卫规划的数以亿万计美元所取得的更为永恒。”（Fischer 1988, 84）一个有趣的想法，但是，这不是事态出现的方式。

侨民物理学家是一个个的人，不仅仅是一些统计数字。作为一个例子，说说弗朗兹·伦敦，他是波兰出生的犹太人血统物理学家。伦敦作为一名哲学学生开始其学术生涯，在量子力学做过重要工作。在苏黎世与薛定谔一道工作。他追随薛定谔到柏林。

在苏黎世期间，1927 年与海特勒一道写了一篇量子力学的开拓性论文，第一次用量子力学说明共价键。在柏林的岁月里，他主要关注于化学物理。到 1933 年，他作为一名具有原创性的杰出物理学家而出名，虽还不是具有获诺贝尔奖能力的人（他曾入围诺贝尔奖提名，但是在化学方面）。由于 1933 年纳粹法令出笼，他被迫请假离开柏林大学，那实际上意味着解雇。跟他的许多同事一样，他接受非正式的物理网络的帮助，1933 年 8 月得到牛津大学一份 ICI 的研究费。在英国期间，他把关注转向低温物理，并参加了西门和门德尔松团队。他跟弟弟汉兹，牛津团队的另一名难民，一道发展了第一个成功的超导（宏观）理论。虽然科学硕果累累，他待在英国并不开心。3 年后，他被通知科研费已到期，不能延长。于是，他设法在巴黎亨利·庞加莱研究所找到一个研究岗位，因为第一年他得到一份来自法国援助外国学者委员会（类似于英国的 AAC）的资助金。在巴黎，他继续研究超导性与超流性。伦敦喜欢巴黎，谢绝了耶路撒冷希伯来大学的一份工作。但 1938 年他接受了北卡罗来纳的都克大学 1938 ~ 1939 年度访问讲师邀请。回到欧洲后，又接到都克大学的邀请，这次是作为理论化学教授的永久职位。1939 年 9 月 1 日，他动身去美国，这一天德国入侵波兰。许多难民物理学家迅速同化了美国环境，但不是所有的人都像贝特、费米或维斯科普夫那样心安理得。伦敦深深地沉浸于欧洲的文化氛围之中，强烈地感到他的世界跟美国南方世界的差别。他在致弗雷德里克·约里奥的信中写道：“我是太欧洲化了，无法成为这里生活的热情者。这里甚至那些幼稚的成年人也是太平静了……在我看来，这里的人缺乏激情，除了桥牌与足球。”（gavroglu 1995, 169）

第十八章 | 从铀的迷惑到广岛

通向裂变的道路

一俟中子被发现，物理学家就意识到：由于新粒子不带电，故可作为核反应中的有效发射体。1932 ~ 1934 年，最早报道的核嬗变用了快速中子撞击铝之类的轻核靶。结果是 (n, α) 、 (n, p) 和 (n, γ) 之类的嬗变过程。就是说，排出 α 粒子、质子或 γ 辐射。当时，费米和他在罗马的团队用周期表中从氢开始的所有元素系统地研究核反应。他们用一个中子源照射一个盛有铍粉末与氢的密封玻璃管。在工作过程中，这些意大利科学家发现——纯属偶然——从石蜡、木材或水穿过的中子极丰富地产生放射性同位素。他们认为：这是由于跟氢核的多次碰撞，中子的速度慢了下来。进一步的实验证实：慢中子比快中子更易于被捕获。当意大利人用慢中子轰击铀时，他得以识别几种 β 发射产物。其中之一的半衰期是 13 分钟。费米、弗朗科·拉瑟蒂和奥斯卡·达哥斯蒂诺发现：放射性不可能来于铀与铝之间的同位素。这一负面论据“提示元素的原子序数可能大于 92”。(Wohlfarth 1979, 58) 这项宣布成了新闻的标题，并且，在意大利作为法西斯文化的一个伟大胜利来庆贺。虽被这一公开宣告所干扰，

费米仍相信他已经生产了第一个嬗变元素。迟至 1938 年 12 月，在斯德哥尔摩的诺贝尔奖演说中，他很有信心地宣称已在罗马为第 93 与 94 号元素起了名字。

1934 年，罗马的宣布激起了在柏林威廉·凯撒化学研究所的奥托·哈恩和李瑟·迈特勒进行类似的工作。该研究所于 1912 年创立，当时主要由德国巨人化学公司直接或间接投资兴办。迈特勒和哈恩第一次相信自己也找到了嬗变元素并于 1935 年报告，该元素“序数极可能远在 92 之上，活动性为 13 ~ 90 分钟”（Graetzer and Anderson 1971, 24）。但是，费米的结果受到伊达·诺达克的批评，诺达克是一位德国化学家，她与后来的丈夫沃尔特·诺达克于 1925 年一道发现了镱。伊达·诺达克发现费米的结论是完全不能确认的，否认他们已经发现了超铀元素 92。她坚持：归根结底，关于中子诱生核反应几乎一片空白。例如，为什么反应产物属于周期表的末端元素？“那是可思议的，”她写道，“在中子轰击重核中，这些核分裂为几个大碎片，它们实际上是已知元素的同位素，但不是被照射元素的近邻。”（Wohlfarth 1979, 63）诺达克的预见核裂变，虽然发表在化学期刊《应用化学杂志》上，对于事态进程却根本没有影响。它肯定是被费米与哈恩及迈特勒所知晓的，但他们没有当真看待。诺达克的批评不仅尖刻，提议又是猜测的，而且，她当时的声誉因有争议地宣称发现了元素 43 而被贬低。元素 43 现在称之为镎，是 1937 年首先被 E·瑟格雷和卡罗·佩里尔发现的。直到 90 年代，才“恢复”了诺达克是裂变假说先驱的名誉。

从 1935 年起，铀研究中心由罗马移到了柏林和巴黎。两个团队进入与其说是合作不如说是竞争的局面。虽然他们一点也不是最重要的，也不是唯一对中子照射铀有兴趣的团队。例如，在贝克莱，菲里普·阿贝尔森试图用受检的、精确的 X 射线谱法来识别超铀产物。可是，在寻找原子序数大于 92 的元素中，阿贝



尔森不能正确地解释他的 X 射线。当裂变假说出现时，阿贝尔森很快发现了镅，从而确认了这个假说。在柏林，哈恩与迈特勒做了大量的实验，提出许多细致的衰变方案，想出各种假说以澄清当铀被中子轰击时所发生的事态。在艰辛工作两年后，他们的主要结论是令人失望的，那就是，被照射的铀产生本性不明的复杂产物，或许包含有某种超铀同位素。然而，并非他们的全部工作都失败了。他们一个假说是：铀产生了铀的异构体，即具有不同半衰期的同位素，但中子数与质子数是一样的。在当时，核的异构体不是一致接受的，唯一知道的（有争议）情况是“铀 Z”，1921 年哈恩将之报道为一种钋的异构体。

哈恩与迈特勒的工作证明异构体的存在，但并未解决铀之谜。在巴黎，伊瑞妮·约里奥·居里研究同一问题，却采用不同进路。1937 年，她跟帕菲尔·萨维奇，在巴黎工作的南斯拉夫物理学家，一同报道了在被照射的铀中有一种半衰期为 3.5 小时的物质，开始他们以为是钷，但经过更多的工作之后，1938 年 10 月他们得出结论：它在化学分离中是随镧之后的，因此，可能是镅——虽然，“总的看来，3.5 小时的性质就是镧的性质。”于是，在第 3 轮中，他们提出 3.5 小时的物质不可能是镅的同位素，而可能是一种超铀元素。如果他们提出接近镧一样的化学性质说明镧具有寿命为 3.5 小时的同位素的证据，那么，他们本可以发现核裂变的。但他们没有。居里与萨维奇的结果令柏林的团队困惑，他们从 1935 年起就一直在扩展，并接纳了分析化学家弗里德里希·斯特拉斯曼。他们在琢磨如何理解巴黎的实验时，迈特勒 1938 年 7 月决定离开德国；现在由留下的哈恩与斯特拉斯曼去寻找答案了。不过，他们与迈特勒保持通信，她仍非正式地属于柏林团队。

正是由于企图说明居里-萨维奇的结果，才使哈恩与斯特拉斯曼走向裂变假说。在铀的被中子轰击后的各种活动性当中，他

们发现其中一个有钡参与，因此得出结论：那可能是一种新的同位素。在他们看来，类镭同位素可能是镭，它是镭的 β 衰变产物。但是镭可以从铀发射两个粒子而产生吗？玻尔、迈特勒与其他人说不，而哈恩与斯特拉斯曼重新回到实验室。1938 年 12 月初他们开始认识到，他们原先认为镭的东西，在行为上与钡的相似性远远多于它与镭的化学相似性。如果是这样，居里-萨维奇物质可能是镭，它是放射性钡的 β 衰变产物。1938 年 12 月 18 日他们有了实验证据：行为像钡一样的东西完完全全地就是钡。但是，镭可以转化为轻得多的元素钡，似乎是不可置信的。因此，哈恩难于做出结论，“或许你可以提出某种荒诞的说明，”他 12 月 9 日写信给迈特勒，“我们自己知道 [铀] 实际上不可能炸成钡。”（Weart 1983, 112）甚至在 1939 年 1 月 6 日哈恩与斯特拉斯曼的论文中，两位作者避免一个确定的陈述说出钡已经被中子照射铀而产生出来。“作为化学家，”他们写道，“我们应该在我们的方案中……用 Ba, La 和 Ce……代替符号 Ra, Ac 和 Th…… [但是] 作为核化学家，更接近物理学，我们不能决定跨出这一跟核物理学先前经验相矛盾的一步。”（Wohlfarth 1979, 58）但是，他们现在瞥见一种可能的证明。他们发现在假定的超铀元素中有一个跟镭相似。如果“镭”是钡，那么，“超铀的镭”可能是镭的较低的同系物，即元素 43，或锝。如哈恩与斯特拉斯曼所说的“Ba + Ma 的质量数总和即 $138 + 101$ ，给出 239”！

铀核捕获一个慢中子可裂变的洞见，首先被迈特勒和她的外甥奥托·弗里什抓住，两人都是来自第三帝国的难民。弗里什在哥本哈根跟玻尔工作，而他的姑妈在斯德哥尔摩的玛尼·西格班研究所有一份工作。当他们于 1938 年 12 月在哥森堡附近的康戈尔夫相聚度过圣诞节时，他们还没有收到哈恩与斯特拉斯曼论文的复件，但他们知道其结果，并试图在柏林实验室中弄清铀核内究竟发生着什么。弗里什回忆说：“我们在雪中走上走下，我在



雪橇上，她走在滑板下缘。……突然间，一个观念形成了：那不是核的切削和炸裂，而是可以用玻尔的核像个液滴的想法所表达的过程；这样的液滴可以拉长与分裂。”（Frisch and Wheeler 1967, 276）核的液滴模型可追溯到 1929 年伽莫夫所做的工作。在后来的几年里，被玻尔、冯维兹瑟克和其他人所发展。玻尔的 1936 年版本，即所谓的复合核对于阐明中子反应机制是重要与合适的。弗里什很熟识复合核理论，他意识到它可能对哈恩-斯特拉斯曼反常提供一个说明。核分裂过程叫做“裂变”，这个名字是一位在玻尔研究所工作的美国生物学家给弗里什建议的。1939 年 1 月 6 日，迈特勒与弗里什在一封致《自然》的信中，报道了他们的裂变假说。这假说是：铀核“在捕获中子之后，把自己分成大致等同的两个核”。此外，裂变是一个激烈的过程：“这两个核互相排斥，应该获得一般为 200 MeV 的总动能。这是从核半径与电荷计算出来的，这份能量实际上可从铀跟周期表的中间元素的结合能之差预料到。”（Graetzer and Anderson 1971, 52）迈特勒与弗里什还借此机会预言：钍会以跟铀相似的方式经历裂变。他们私底下建议哈恩与斯特拉斯曼在裂变产物中寻找作为裂变产物的放射性惰性气体（氦与氙），而当斯特拉斯曼找到这些气体时，裂变假说就被证实了。令人瞩目的是：裂变的发现，20 世纪物理学中最重要的发现之一，是由两名在化学实验室中工作的化学家，而不是由核物理学家作出的。事实上，这一发现使物理学共同体大吃一惊。甚至连柏林的物理学家也万万没有想到物理学界有浓厚兴趣的事物的杰出发现竟在威廉凯撒的化学研究所中发生。

比月光更亮

关于铀核裂变的新闻迅速在国际物理学共同体中传开来。传

播路线是在哥本哈根开始的，弗里什在那里向玻尔报告了事情的原委。玻尔正准备去美国，他大为震惊，但立刻接受了裂变假说。1939年1月3日，弗里什致信迈特勒写道：玻尔“只是对他未曾率先想到感到震惊，那是从核结构的现有概念可如此直接地推得的”。这里指的是核的复合模型。1939年1月16日，玻尔跟他的合作者里昂·罗森费尔德到达纽约。罗森费尔德径直去到普里斯顿，在那里，他议论了在德国、瑞典和丹麦获得的一些结论。在迈特勒与弗里什的论文出现前所作的宣布，曾引起一场轰动。费米、约翰·惠勒和其他美国物理学家立即投入裂变研究。1939年1月末，玻尔出席第5届理论物理华盛顿会议，在那里他与费米讨论了新型的核过程，玻尔从液滴模型定性地说明了这一过程。“对于全体在场的人来说，整个事态是意想不到的，”三位美国物理学家在《物理评论》2月第15期报告说。裂变仍是一个假说，在欧洲和美国第一阶段的工作都关注于证实迈特勒-弗里什的成果。在一两个月内，利用不同方法来验证。首先是由哥本哈根的弗里什做的，他用一个闪烁计数器记录在电离室中裂变碎片所产生电脉冲。不久之后，贝克莱的物理学家德尔·克森和R·索恩顿利用云室照片产生第一个裂变影像。

到1月底，关于铀裂变不再有任何疑虑了；第二阶段就是研究自持链式反应的可能性。弗里什和迈特勒都没有链式反应的概念。这种可能性似乎是哥本哈根的克里斯蒂安·莫勒首先向弗里什提议的，但开始弗里什并不在意，毕竟，没有次级中子的迹象。然而，人们早就认识到：如果一个裂变不只是导致两个核碎片，还有一个或更多的中子，那么，链反应就是可能的。约翰·邓宁，哥伦比亚大学的一名物理学家，是证实迈特勒-弗里什裂变假说的第一批人其中的一个。那是在1939年1月25日做的。如他在当天的实验笔记中所写的，“请相信我们已经观察到具有深远结果的现象。……这里是真正的原子能！……次级中子是极



其重要的！要是次级中子发射使自持的核反应成为可能该多好啊，那是我从 1932 ~ 1935 年一直怀有的主要希望：用慢中子‘燃烧’物质，并释放原子能。”（Badash, Hodes, and Tiddens 1986, 210）每个裂变所释放的能量为迈特勒与弗里什所正确估计的 200 MeV，1939 年春均为哥伦比亚大学与普林斯顿大学测得。这两个团队都发现：两个碎片具有不等的质量，碎片动能接近 175 MeV，其余 25 MeV 归属于其余产物，包括多余的中子。这里产生出来的中子，1939 年 3 月首先被弗雷德里克·约里奥和他的合作者汉斯·冯哈尔本以及列夫·科瓦斯基，后不久又被两个美国团队观察到。法国物理学家得出结论：每次分裂平均有 3.5 个中子，后来这个数字更正为 2.4。重要的是：数量多的中子很有可能造成链式反应。可是，从理论考量，玻尔猜测：绝大多数铀 238 同位素不会被慢中子裂变，只有稀少的（0.7%）铀 235 才行。这一猜测不久得到更进一步的理论支持，但缺乏实验证实。1940 年 3 月，实验才证明玻尔是正确的。新的知识似乎意味着：裂变能量的任何应用，将是极其困难和代价高昂的。

1939 年，关于亚原子能量的猜测一点也不新鲜。自从放射性被发现后，许多人，科学家与非科学家，都提出过一种新的、威力巨大的能源埋藏在原子的内部。1904 年，索第戏剧般地把地球描绘成“充满爆炸物的仓库，不可思议地比任何我们所知道的更有威力，可能只等一个合适的起爆器就把地球变为一团混沌”。11 年后，小说家 H·G·威尔士在他的《世界安顿和平》一书中就写到威力无比的原子弹。关于原子弹既用于和平又用于战争目的的轻松谈话令卢瑟福烦透了。1933 年，在英国协会前的一次讲话中，他说：“凡说利用我们现在拥有的手段与我们现有的知识就能利用原子能的人，是在谈论月光。”3 年后，玻尔提到，“被讨论的大多数问题是为了实际目的释放核的能量，”他作出结论说，“我们关于核反应的知识越进步，目标似乎变得越遥远。”

(Rhodes 1986, 227) 裂变的发现并未使玻尔改变他的谨慎态度。1939年12月6日, 在对一群丹麦听众的讲话中, 他回顾了核物理学的最新发展, 包括铀裂变中会释放巨大的能量。“人们可以理解如果一定量的铀或钍可能被弄得爆炸的话, 我们将会面临多么可怕的前景。”他说, 但是没有任何理由担心, “一种更仔细的考察表明: 没有理由在这方面发出警告, 虽然人们不能肯定地说原子能的任何大规模的释放被完全排除掉了。”分离两种铀的种种困难一直横梗在他心中。然而, 其他物理学家很快就猜测到一种可能的铀炸弹。1939年2月奥本海默致信给乌伦贝克: “我认为那实际上不是完全不可能的, 10立方厘米的氟化铀(人们应该有某种使中子减速却又不捕获它的东西)很可能把它自己炸到地狱中去。”(Smith and Weiner 1980, 209)

到1939年底, 共发表了100多篇关于裂变的论文, 从而, 大量的知识被欧洲与美国的物理学家所积累。德国、英国和美国所发表的许多评论文章总结了有关知识。一篇早期评论文章是剑桥大学的诺曼·菲瑟于1939年5月完成的, 他的结论是: “现在必须考虑可能存在一个放热分裂的累积过程。”(Graetzer and Anderson 1971, 79) 一篇德国评论文章由西格弗里德·夫鲁吉所写, 《原子核的能量能在技术上派上用场吗?》是问题又是标题, 并肯定地回答了这个问题。他的结论是: “原子机器”的确是可能的。原子能仍不是一种实在, 但它肯定也不是月光。理论上的理解还不是完全的, 但玻尔和惠勒1939年8月的半经典理论为进一步理解奠定了基础。玻尔和惠勒的论文刊登在1939年9月1日的《物理评论》上, 那是第二次世界大战开始的同一天。

在1939年头几周兴奋的日子里, 虽然铀弹的可能性没有明显地被讨论, 物理学家们意识到裂变研究总有一天可能导致一种爆炸, 而且, 可能首先是在德国。美国从事裂变研究的核物理学家是从欧洲近来移居到美国的, 他们一开始就对局势表示担心。



其中一人是利奥·斯兹拉德，一位曾在英国工作、现侨居美国渴望跟踪裂变研究、富于空想的匈牙利难民。早在1934年，斯兹拉德曾想象过可能导致激烈爆炸的中子链反应。但是他打算利用的是铍，而不是铀。为了防止德国生产铀弹，斯兹拉德1939年2月建议，物理研究人员对铀研究实行完全的保密。物理学界对斯兹拉德的非同寻常的建议持怀疑态度，虽然几位杰出物理学家支持他的提议。但是，反对者也是物理学家，理由是优先权问题。因为他们发现那是不现实的，或者，只是反对保密这一措施，这是跟科学的理想相悖的；而且，许多人觉得炸弹的可能性是如此之遥远，连讨论它也是多此一举。尽管如此，斯兹拉德坚持己见，经过一番争论，大多数物理学核心人物愿意支持秘密计划。但不是所有物理学家持这一态度。约里奥和他在法国的团队不愿停止发表他们的工作。加上其他的原因，斯兹拉德的想法不能立即实现。整个1939年，各物理期刊继续刊登裂变方面的文章，任何能读懂它们的人都可得到。

可是，局势随战争的宣布而改变。从1940年起，英国和美国的物理学家同意停止公开发行一切可能涉及利用原子能的出版物。在英国，已经有了一道出版禁令，并且，1940年4月格瑞哥里·布莱特成为美国铀研究审查委员会主席。尤其值得一提的是，物理学家同意这样一个严厉的举措，他们的同意完全出于自愿，丝毫不是出于他们政府的压力。并且，他们实际上进而对德国以及有段时期也对前苏联科学家保密西方的核研究。埃德文·麦克米伦和阿贝尔森宣布发现“放射性元素93”（镎），发表于1940年6月。那是《物理评论》上刊登最后一批有关铀论文中的一篇。下一个重要得多的嬗变元素钚是由贝克莱化学家格伦·西伯格和他的同事于1941年发现的，但那时出版禁令已经生效。西伯格获诺贝尔奖的发现于1946年首次公之于众。当时有个注脚：“这信被接受的发表日期指明为[1941年1月28日]，但自

愿从发表中撤回直至战争结束。”在 1946 年《物理评论》的各期中附有许多这样的注脚。

第一次认真地探究原子弹可能性的努力，是在英国而不是在美国发生的。1940 年 3 月，弗里什和帕尔斯就一颗铀“超级炸弹”原则上如何构造，以及它如何运作，作了一个快速的研究并写出一份备忘录。他们估计一克金属铀 235 足够制造出一颗炸弹，而且，“这个 5 千克炸弹释放的能量等价于几千吨甘油炸弹”，而它产生的辐射等价于“几百吨镭”。除了略述了炸弹的机制，他们也谈到了这种“实际上无法抵抗的”超级炸弹在政治、伦理和军事等方面的特殊性，并且，担心德国已经上路了。超级炸弹的一个特点是：“由于放射性物质随风扩散，这种炸弹或许不可能使用起来不伤害大量平民百姓，因此，这可能不适合本国作为武器来使用。”（Serber 1992, 81 and 86）作为弗里什-帕尔斯备忘录的结果，一个叫做 MAUD 的从事超级炸弹委员会组成了。物理学家与委员会一道考虑各种问题，特别是同位素的分离方法、生产钚的可能性，以及在不同的铀体积中中子的损失与增殖。英国许多物理学的首脑人物都参加进来，包括弗里什、帕尔斯、克默、西门、科恩、克蒂以及克劳斯·弗奇斯等难民物理学家。法国沦陷后，哈尔本与科瓦斯基从巴黎逃亡出来也加入这个行列。MAUD 委员会于 1941 年夏写了它最后的一个报告称：原子弹是可行的，不过，需要一个大得多的组织来进行这项工作。该项目极为庞大，或许，单靠英国是负担不了的。在当时，英国与美国从事核能研究的物理学家合作甚少。德国共产党员难民物理学家克劳斯·弗奇斯，把英国 1941 年的核物理工作信息传给了莫斯科。后来在战争期间成为前苏联信息情报网络的一个中心人物。他把战争期间美国原子弹工程中所发生的进展向莫斯科报告。



走向原子弹

美国原子弹计划的发展，一般称为曼哈顿工程，一直被经常描述，曼哈顿由此享有盛名。我们将仅回忆这项工程的几个实质性步骤。按照传统说法，事情是从爱因斯坦 1939 年夏致美国总统罗斯福的信开始的。这封著名的信实际上是经过跟维格勒与泰勒多次商量之后由斯兹拉德打印出来的。爱因斯坦告诉美国总统他有理由相信，“铀元素即将可转化为一种新的重要能源……现在，看来几乎肯定的是这种〔链反应〕可能即将成功。”此外，“这种新现象也会导致制造炸弹，而且，那是可以想象的——尽管很不能肯定——一种新型的威力极大的炸弹可能因此而被制造出来。一个这样的炸弹用船携带，在港口爆炸，可能摧毁整个港口和周边地区。不过，这样的炸弹可能由于太重而不能空运。”（Graetzer and Anderson 1971, 93）德国可能已经沿这条路子行动了，——爱因斯坦特别提到冯维兹瑟克——并为此之故，爱因斯坦劝告罗斯福采取行动。除了总统委任了一个铀咨询委员会，这信没有产生直接效果。大约一年之后，美国开始认真地准备战争，包括建立以工程师与物理学家范尼瓦·布什为主席的国家防卫研究委员会（NDRC）。铀委员会被重新确定为 NDRC 的下属委员会。1941 年，NDRC 被纳入一个更大与更有效率的组织科学与发展办公室（OSRD）之中，布什仍任主席。那时，美国的物理学家、化学家和工程师已着手研究铀的链反应，但仍处于探索阶段。这工作兼并实验性与理论性，除了其他事物，还涉及由费米、维格纳、惠勒和其他人发展的、受控链反应的一般理论。劳伦斯的一份报告强调用钚做炸弹材料的可能性。“如果可获得大量的元素钚，”劳伦斯写道，“用慢中子产生链反应是可能的，在这样的反应中，能量以爆炸的速率释放出来，它可说成是一种

‘超级炸弹’。”(Smyth 1945, 65)

在日本偷袭珍珠港之后，核计划被大大地扩展和加速，政府将大量资金投向有关原子弹的研究之中。以阿瑟·康普顿为首的冶金实验室在芝加哥大学创立，费米是实验核物理团队的头。现在目标很清楚：以铀 235 或钚为基础，制造一颗原子弹。康普顿决定第一步必须是慢中子链反应，接着是用铀反应堆生产钚，然后，用反应堆生产的钚制成一颗炸弹。按照他的计划，反应堆在 1943 年 1 月准备就绪，2 年后，制成原子弹。工作令人满意地进行着。理论与实验的研究指示：一颗能量至少相当于 2 000 吨 TNT 的炸弹可以如期准备就绪。但这要求大量的投资和一个在规模与复杂性上只有军队才能应付的组织。1943 年初，所有的努力汇集在一个新的军事组织的名下，代号是曼哈顿工程部，以陆军准将列斯利·格罗菲斯为首。

在扩展后的计划中的第一步是制造一个原始反应堆，以确定铀中的链反应是否可能。这是费米与他在芝加哥大学的合作者们的任务。他用石墨砖作为从高性能的铀自然产生的中子的减速剂。芝加哥的“堆”称为 CP-1，用了 385 吨石墨，6 吨纯铀和 34 吨氧化铀。1942 年 12 月 2 日未经太大的努力很快就达到了倍因子超过 1 的临界水平。费米欢喜雀跃，不仅因为工作如此成功，而且，因为反应堆如此易于被吸收中子的镉棒所控制。“运作一个反应堆就同左、右地操纵方向盘，保持汽车在一条笔直的公路上行驶一样容易，”他写道。这种只生产小量功率的可控核能的第一种情况，不是关键，因为它的目的不仅是产生热量与电量，CP-1 还要作为一个钚发动机的原型。它的成功，使 OSRD 有信心把一颗原子弹及时制造出来用于战争，同时意味着，需要工程的另一次扩大规模。1942 年底，罗斯福同意布什计划用 2.5 亿美元生产铀 235 和钚。能够生产多少钚以及要花多少时间，都是不确定的。为此，决定首先用两种裂变物质进行。做铀原子弹



的最可怕的问题是，把铀 235 从自然铀中分离出来。考虑了几种方法，发现气体扩散法最切合实际。这方法是让气体六氟化铀流经一系列多孔塞桶。劳伦斯提议的另一个方法是利用巨大的电磁铁，或“卡留管”，作电磁分离，这方法受到欢迎。1944 年，应用这两种方法的工厂，配备了热扩散工厂。三种方法整合成一个巨大的系统，建在田纳西州奥克莱德，那里于 1945 年 4 月开始生产铀 235。奥克莱德包括一个铀反应堆。但用来生产钚的原子弹的三个巨大的冷却反应堆，建立在华盛顿的汉弗德。

原子弹的设计是一群物理学家的的工作，1943 年春，在新墨西哥州洛斯阿拉莫斯组装。J·罗伯特·奥本海默任实验室主任，建立了 7 个部门：其中的理论部由贝特负责，实验部由罗伯特·威尔逊负责，炸弹物理学部由罗伯·巴彻负责，爆炸部由乔治·基斯提尔科夫斯基负责。奥本海默原先一直不是从事铀研究的，由于几年前偶然同情共产主义被某些军事集团认为是危险分子，但是，格罗菲斯深信奥本海默是位有能力的领导人，并且，他的直觉证明是正确的。为物理学家与将军们所尊重的奥本海默正是一个不可能的任务的正当人选。理论家和奥本海默的同事罗伯特·塞尔伯为洛斯阿拉莫斯的美国物理学家作了“如何制造一个原子弹”的 5 个讲座的报告，介绍必要的技术背景知识。正如面对什么也不知道的人一样，塞尔伯一开始就指出：“这工程的目的是以炸弹的形式制造一种实际的军事武器，其能量是被在一个或多个确认的核裂变材料中的快速中子链反应释放的。”（Serber 1992, 3）在原子弹中，中子必须是快速的，不像反应堆中的中子是慢速的，尚不知道链反应是否实际上可用快中子发生。在洛斯阿拉莫斯的早期实验中，证明这是能行的，还指示出炸弹的临界体积。

在新墨西哥州沙漠中物理学家研究的另一个重要问题是：如何从两个亚临界质量装配成一个临界质量的可裂变材料。方法之

一是弗里什与帕尔斯在其备忘录中提到的方法的一种更精细的版本。这就是，把一个亚临界质量射入另一个之中，然后把它“内爆”进入一个体积小得多的、密度大得多的质量之中。虽然质量相同，较高密度的会是超临界的。爆炸法未被检验，它远比枪射法要复杂得多。但已证明只在钚弹中才能用内爆法。物理学家发现：钚 240，不可避免地伴随有正常钚 239 的出现，会经历自发的裂变，因而产生很多的中子，致使枪射法运作。（铀中自发裂变已被前苏联物理学家乔治·弗列罗夫和康斯坦丁·佩特兹哈克所发现，在 1940 年《物理评论》上报道过。）专家们决定不单靠一种类型，钚内爆炸弹或铀枪射炸弹，而是同时发展两种炸弹。炸弹工程的最后阶段发生在 1945 年夏，在德国无条件投降和欧洲战事结束之后。炸弹本来是计划用于对付第三帝国的。但新局势的发展已经超越曼哈顿工程的进度了。只剩下日本了，巨人投射的动力似乎超出控制。

从事曼哈顿工作的物理学家是些什么人呢？列出参加者的名单或许是比较容易的，因为它包括了大多数西方世界最杰出的物理学家，从传奇人物玻尔到年轻的后来居上的理查德·费曼。两人对于工程具有同样的价值。关于玻尔，正式称呼是“贝克博士”，奥本海默 1944 年初向格罗夫斯报告称：“贝克博士本人从根本上关注关于核裂变与相关主题新资料的关联与解释。……〔但是〕关于我们计划的工程问题知道甚微，虽然他当然意识到它们的重要性与困难性。”关于费曼，奥本海默 1944 年末写道，他“不仅是一位极其卓越的理论家，也是一位最健壮、最负责与最热情的人，一位杰出与善教的老师，以及一位不知疲倦的工作者。”（Smith and Weiner 1980, 270 and 276）

最活跃的曼哈顿研究人员的很大一部分是早年住在欧洲的物理学家。看一下表 17.2，就可以发现炸弹工程的许多核心人物。其中之一是詹姆斯·弗朗克，1925 年诺贝尔奖得主，他 1935 年



离开德国，此时在芝加哥工作。他是少数从事炸弹工程而又在早期阶段就对它的政治与伦理后果发出警告的科学家之一。1945年6月11日，在第一颗原子弹爆炸之前，他与他的6位芝加哥同事向战争秘书写了一个报告解释了他们的立场。“科学以前常常被指责为敌对国家的互相摧毁提供新的武器，而不是改进人们的生存状况，” 弗朗克写道，“我们现在觉得不得不采取一种更加积极的立场，因为我们的发展核武器的成功充满着、比过去所拥有的一切发明都大得多的危险。” 附和玻尔的许多论据，弗朗克展望未来，警告一场核武器竞赛，因为“核弹不可能只在一个国家控制下作为‘秘密武器’保存许多年”。更具体地，弗朗克的报告劝告美国炸弹是“在一次适当选择的无人区中的展示暴露给世界”（Graetzer and Anderson 1971, 104）。但是，事态的发展不是这样的。弗朗克和他的小群体没有获得军事领导的认同；他们的担心他们的态度远远不是参与曼哈顿工程大多数物理学家所共有的。大多数物理学家没有从道德上反对从事大规模杀伤武器。有些人是拒绝的，但一般的态度是：从战争局势来看，以及希特勒可能首先获得炸弹，这项工作是正义的。此外，许多物理学家只是“对迷人的、困难的科学与工程问题‘有兴趣’”，如戴维·安德逊在40年后所回忆的。（Badash, Hodes and Tiddens 1986, 222）

两个城市的毁灭

“最触目惊心的印象是一片通明的亮光。……我被这新的景观所震撼。尽管我戴着墨镜，我看到天空以难以置信的亮度闪烁着。……我相信，我立即想到爆炸可能是大气着火，再燃烧地面，尽管我知道这是不可能的。”（Rhodes 1986, 673）这是埃米里欧·瑟格瑞目睹历史上第一次核爆炸时的印象，即1945年6月

16日上午5:30在阿拉莫嘎多沙漠进行的所谓复活节试验。炸弹安装在30多米高的铁塔上，为钚内爆型。实验取得完全的成功，其能量相当于1.8万吨TNT，超过了大多数物理学家的预期。这就是观察到壮观现象的物理学家所关心的，他们没有弗朗克式的忧虑。“自然，我们对于实验的成功欢天喜地，”胜利者维斯科普夫回忆道：“我们奔走相告，互相祝贺。然后，一片冷清，那不是早上的寒冷。”（Rhodes 1986, 675）钚弹运作的漂亮，铀弹有了足够的材料，一切都已成竹在胸。因此，不需要再做试验。实际行动的时机到了，目标是摧毁日本城市。在那以前，炸弹的发展一直是物理学家的事，他们的声音在政治与军事讨论中也是重要的。但是，决定用什么炸弹当然是军事与政治领导人的事。在洛斯阿拉莫斯、贝克莱、芝加哥和别处的物理学家有大量的讨论，但他们形成不了一个统一的战线，整体上来说，他们倾向于跟军事领导人的一致。由康普顿、费米、劳伦斯和奥本海默组成的科学咨询小组觉得除了让炸弹在日本人口稠密区爆炸外别无选择。不管怎样，新总统杜鲁门决定炸弹应尽快按将军们的判断投在日本上空。这项决定是否明智一直是无休止讨论的主题。但是，重要的是它已经投下。在这期间，在7月初，物理学家关于他们已经制造出来的东西，没有说太多的话。

第一个创造物叫做“小男孩”，是1万吨重（当量）的铀弹，约3米长，直径约1米。1945年8月6日，它由B-29轰炸机“依诺娜盖伊”携带，于上午8:15在广岛上空投下，离地600米高度爆炸。一切按预计的方式进行，但没有迫使日本答应无条件投降的要求。3天后，“肥人”接手，从另一架B-29轰炸机（叫做“博克卡车”）在长崎投下一颗钚弹，高度同前，上午11:02爆炸。这也是按计划实施的（表18.1）。5天后，日本政府与日本天皇投降，第二次世界大战结束。

20亿美元炸弹计划是历史上最大的研究项目，牵涉比任何先



表 18.1

两颗原子弹的情况以及它们的后果

	广岛	长崎
炸弹类型	铀-枪射	钚-内爆
炸弹重量 (吨)	4	4.5
爆炸威力 (TNT 千吨)	12.5	22
人口	285 000	270 000
被摧毁建筑物总数	54 000	14 000
第一阶段死亡人数	105 000	65 000
受伤人数	75 000	40 000
被摧毁总面积 (平方千米)	13	6.7
每平方千米死亡人数	8 000	9 700

注：基于 The Impact of the A-Bomb (Tokyo: Iwanami Shoten, 1985) 给出的资料。

前或继后项目更多的科学家和金钱。对大多数人来说，它戏剧性地证明：科学，特别是物理学，有能力赢得战争与改变历史进程。实际上，曼哈顿工程完成得太迟了，对于战事不具有决定性意义。原子弹的实际意义是政治的而不是军事的。这是战争结束之后才变得清楚的。从军事观点看，另一个与军事关系密切的物理学领域——雷达的较少公开的研究具有大得多的重要意义。

在发展原子弹的庞大计划中，这项军事定向的核研究也在其他国家争先恐后地进行着。只有在美国项目才成功了。在日本，海军确立了一个铀规划，目的是发展一个驱动军舰的核反应堆。但由于它似乎代价太高而且不确定，所以被撤消了。在东京大学，仁科方雄领导一批人探索分离铀 235 的可能性，以便制造一颗炸弹。不过进展很缓慢。在前苏联，一个铀委员会于 1944 年 8 月建立，隶属于科学院。委员会的任务是研究提取铀链反应的能

量的可能性。委员会中的前苏联物理学家伊尤里·卡里顿、伊罗·彻尔多维奇、弗列罗夫和伊罗·克查托夫独立地复制了弗里什与帕尔斯在伦敦的工作。1941年早期，他们计算了铀235的临界质量，发现它约为1万克。他们甚至计算了一个重的中子反射器。后不久，克查托夫认识到钚的重要性，并强调利用新的元素可能是制造一颗原子弹的最好方法。1941年，为克查托夫建立的“实验室2号”，性质与美国的洛斯阿拉莫斯相当，但比它小多了。一年后，它有74名人员，其中25名科学家（在洛斯阿拉莫斯工作的有2000人）。前苏联的炸弹项目由于缺乏材料，特别缺乏铀与石墨，大大地耽搁了。但是前苏联有个优势，那就是美国的秘密工程有关信息由弗奇斯通报过来。他以德国难民身份在洛斯阿拉莫斯工作。然而，到1945年，俄罗斯甚至还没有达到制造一颗原子弹的水平。他们直到1944年8月才从列宁格勒回旋加速器得到他们的第一毫克钚，而且，第一个前苏联反应堆（称为F-1）在1946年最后几天处于危机状态。

德国的努力被英国和美国的物理学家们提心吊胆地关注着。德国起步得很早，1939年春——正当巴黎宣布发现次级中子之后——德国核物理学家已经指出了铀物理学具有潜在的军事应用价值，而且，铀协会开始了一系列的聚会。这个群体包括弗勒吉、保尔·哈特克、弗里兹·鲍普、海森伯、冯维兹瑟克和瓦尔瑟·格尔拉赫和其他人。在莱布兹希大学、哈姆堡大学、柏林的威廉·凯撒物理研究所和其他地方建立了几个核研究团队。核协会的目标是研究利用核能的可能性，主要以反应堆的形式。那可用来驱动潜水艇甚至飞机。最初，原子弹列入了议事日程，但没有优先考虑。然而，物理学家清楚地意识到制造原子弹的可能性。在1942年2月的一次谈话中，海森伯提及铀235的分离会“导致一个威力不可想象的爆炸”，并且，一个铀机器“也可导致制造一个威力难以置信的爆炸”（Hentschel 1996, 300）。在战争



的头两年，德国的铀研究跟英国和美国的研究处于同一水平。但1942年以后走下坡路，军方丧失了对该项目的兴趣，没有意识到美国所发生的进展。海森伯和他的同事们集中于制造一座反应堆。战争结束时，海森伯被捕入狱。原先的机器尚未达到危险运转的水平。海森伯、哈恩和被扣留在英国农庄的其他德国物理学家，听到“小男孩”被扔在广岛的消息时，大为震惊。

人们可能得到这样的印象：在战争期间，整个物理学共同体都全神贯注于军事科学。他们既没有时间也没有欲望从事纯科学探讨了。然而，情况远不是这样的。虽然，在1940~1945年，通常学术物理学被大大地削弱了，但仍有许多物理学家从事于纯物理学领域，并在这方面产生了大量的论文。狄拉克拒绝参加曼哈顿工程，继续研究量子电动力学（他也做些有关英国炸弹项目的工作）。玻恩跟军事科学不沾边。“我不被干扰地继续我的工作，”1940年他致信爱因斯坦说，“不久我的系〔在爱丁堡〕将是英国继续干理论物理学的唯一场所。”（Kragh 1990, 159）在中立国爱尔兰新都柏林高级研究所，薛定谔讲课并安排理论物理讨论会，与会者包括海特勒、狄拉克、爱丁顿和玻恩。甚至海森伯，卖力从事核机器，也挤时间关注纯理论。战争结束前刊在《物理杂志》

表 18.2 在所有期刊，以及《物理评论》与《哲学杂志》上的论文数

年份	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
论文	5081	4705	3230	2737	3152	2968	2687	3148	3273	3765	4088	7500
物理 评论	2965	2914	1677	1041	1008	428	417	945	1517	2240	2307	2275
哲学 杂志	2237	1478	1130	1026	910	851	855	875	884	913	1008	1278

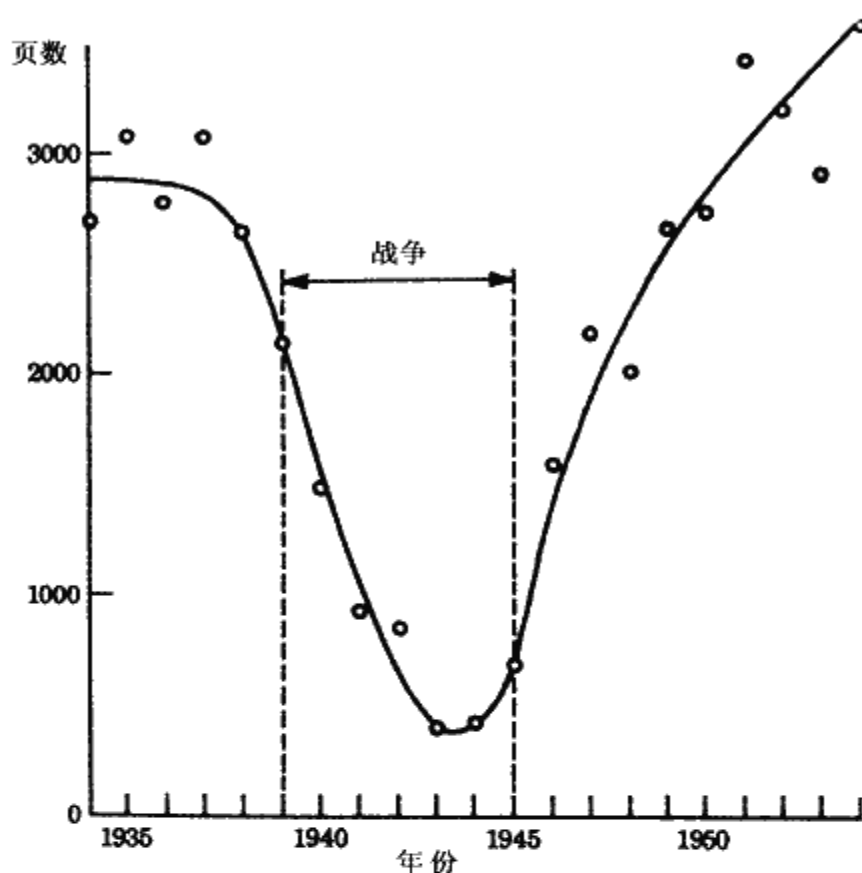


图 18.1 物理出版物的量与战争的进展关系对照。《伦敦皇家学会》前栏为每年发表的页数，每页印刷面积按 1955 年诺曼格式所允许的量的变化

来源：E. Bullard, "The effect of World War II on the development of knowledge in the physical science," *Proceedings of the Royal Society A* 342 (1975): 519-36.

上的最后一篇论文是他的《基本粒子理论的可观察量》的第三部分。人们可以想象得到：这是一篇远离军事应用的论文，交稿日期是 1944 年 3 月 12 日。日本理论家，包括朝永振一郎与阪田，同样在战争期间从事基本问题的研究。朝永振一郎的重要论文《论量子场论的相对论重新表述》在日本发表于 1943 年。

战争在质与量两方面对学术物理学产生了极为严重的影响，



那是不可否认的。世界物理学在 1944 年仍幸存，但处于一个低水平。由《物理文摘》摘出的论文数以及物理学两个领导期刊发表的论文数（表 18.2）说明了物理出版物的减少和和平之后的缓慢回升。图 18.1 和图 18.2 分别展示了英国这一时期出版物的沉沦。

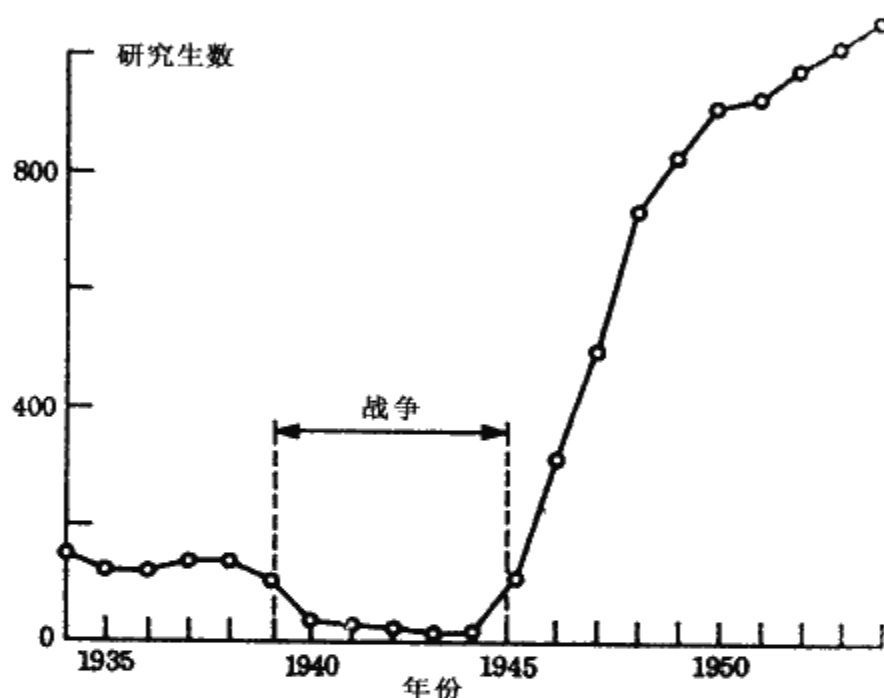


图 18.2 每年研究生总数与战争进展的对照（他们中大部分是由科学与工业研究部赞助的理科学生）来源：E. Bullard, "The effect of World War II on the development of knowledge in the physical science," *Proceedings of the Royal Society A* 342 (1975): 519-36

第三部分 进展与问题

第十九章 | 核主题

原子核物理学

核物理学在 20 世纪 30 年代末期戏剧般地发展。由于提供了以铀为基础的、令人吃惊的原子动力源，证明了它的价值。战后，当物理学家回到大学，并且，1941 ~ 1945 年所做的大部分研究保密度降格时，年轻的核物理学领域经历了一个显著的发展。在联邦财经的大力扶持下，它或许成了物理学最有声望的领域，吸引着大批最阳光的学生。

多亏贝特、玻尔、惠勒、维格纳和冯维兹瑟克等人的工作，核理论的基础在战前就已经奠定。然而，感人的进展只是乐观的愿望，关于核中把质子与中子牢固地捆绑在一起的核力理论却知道甚微。一般相信：核子之间交换的介子的汤川理论是关于核力理论的最好尝试。在战争中以及之后不久，泡利、罗森费尔德、莫勒和少数其他理论家努力发展核力的介子理论，但他们的复杂计算不能令人信服地说明核力。失败的两个主要原因是：关于汤川介子（ π 子）以及它与核子的相互作用知道得太少；还有，这些理论只假定存在一种介子。当然，认为汤川量子是从宇宙辐射



得知的轻粒子是于事无补的。即使利用 1947 年的强衰变新介子，核力的阐明仍证明是极端困难的。只在 60 年代初期发现了新型的短寿命介子，问题才得到部分的解决。在其 1947 年《基本核理论》中，贝特说介子理论“迄今为止尚未就核力给出一个跟经验事实一致的结果”。然而，失败不是完结。无论如何，失败并未阻止物理学家去探索核的结构，不论它捆绑得如何紧密。

30 年代末期人们喜欢的模型，那个用之理解裂变过程的模型，是玻尔和惠勒所发展的液滴模型。按照这个模型，核近似于极端高密度的不可压缩的液滴，核子相互地、强烈地和集体地捆绑在一起，犹如液滴中的分子。这模型相当成功，但仍旧不能说明许多实验事实。例如，液滴模型不能说明核能谱中发现的各种激发态。1949 年，它受到壳层模型的挑战。跟液滴模型一样，壳层模型在 30 年代就有其根基。早在 1933 年，德国物理学家瓦尔特·埃尔萨瑟采用了一年前由美国人 T·巴特列特的一个建议，提出核子可以占有量子能级，类似于原子中的电子。这样，他可以说明化学元素的丰度以及核结合能的各种规则性。埃尔萨瑟关于核壳层的思想为众人所知晓，但缺乏理论的论证；它也不能说明经验资料所提示的、在中子数为 82 与 126 时形成闭壳层。因此，它被那些喜欢经验上成功的液滴模型的大多数物理学家所不齿。

只是在 1948 年，当玛莉亚·乔佩特·迈耶把分散领域的证据收集在一起时，证明了不久被称为“幻数”的实在性，某种壳层安排的实在性才变得清楚。幻数这个名字似乎是维格纳取的。波兰出生的德国物理学家迈耶（母名，乔佩特）曾在哥廷根学习过，师从于玻恩。1930 年她侨居美国。1946 年，她搬到芝加哥，在那里跟泰勒和费米一道工作，并且，在阿冈内国家实验室有一份半日工作。就在那个时期，她渐渐地悟到与一定的核子数相关联的、一系列惊人的规则性，同时读到了埃尔萨瑟 1933 年的论文。迈耶坚持

认为：具有 2, 8, 20, 50, 82 和 126 个质子或中子的核是特别稳定的，因此，这些幻数代表着核的闭壳层。这些核不仅具有很大的结合能，而且，比它们的邻近的核拥有明显大的丰度。瑞士-挪威地质化学家维克多·哥尔德什密德特在 30 年代辛苦地收集关于宇宙元素丰度的资料，被用来增强对于微观世界与宏观世界两者的洞见；这些资料为原子核的结构提供了证据，它们对于伽莫夫的“大爆炸”新模型也是至关重要的。其实，迈耶的关于核的壳层理论，是经历了她试图理解元素如何宇宙地形成的一番失败的努力之后才形成的，她接受了埃尔萨瑟用壳层模型说明幻数的修正版本，并和德国物理学家汉斯·詹森及他的合作者奥托·哈克瑟尔与汉斯·舒斯独立地提出的。詹森对核幻数感兴趣有许多年头了。在战争期间，他在奥斯陆跟哥尔德什密德特讨论过这一主题。1948 年，他又跟玻尔讨论过。尽管玻尔经营着液滴模型，他鼓励詹森发展他的观念。可是，如他在他的诺贝尔受奖演说所回忆的，当他把他、哈克瑟尔与舒斯的合作寄给“一个严肃的期刊”时，被拒绝了，原因是“它不是真正的物理学，而是玩弄数字”。只是当他通过维斯科普夫寄给《物理评论》时，它才被接受。

引入每个核子的轨道角动量与自旋角动量之间的耦合，迈耶与詹森就得以说明相关于幻数的广泛资料。特别稳定的核是那些拥有总自旋为零的闭壳层的核。激发态归结于一个在较高轨道上的“价核子”。与液滴模型相反，壳层模型假定每个核子独立于其他核子，在核场中近乎不受干扰的轨道上运行。因此，简单的壳层模型也称为独立粒子模型。这理论的说明功能与预示功能，强烈地暗示它至少是部分正确的；因而，很快被人们所接受，并为其他核物理学家所发展。必要的自旋-轨道耦合的本源有点神秘，但那无关紧要。1963 年，壳层模型的意义被诺贝尔委员会认可，诺贝尔物理奖的一半授予迈耶与詹森（另一半给予尤金·维格纳）。物理奖授予一名妇女，这只是第二次，也是迄今为止的最后一次。



于是，约在 1950 年，关于核结构有两个大的理论：液滴模型与壳层模型。两者都很成功，但成功是局限的，因为它们各不能说明一定实验资料。即使去掉一些简化假设，把模型发展成一些更复杂的版本，仍有些理论说明不了的问题。此外，两个模型是互相矛盾的：一个把核视为一个总体系统；另一个把核视为独立的。这是物理学的一种经典的情况。如许多类似情形一样，答案是：把两个模型视为一个更复杂模型的两种极端情形。在当前情形中，这是一种寓液滴与壳层于一身的综合模型。1950 年，哥伦比亚大学的詹姆士·雷恩瓦特发现在稀土元素群中核电四极矩跟壳层模型不一致的证据；他由此提出核不是球形，而是椭圆形。约在同一时间，A·玻尔（N·玻尔之子）和美国-丹麦物理学家本·莫特儿逊，开始发展一个椭状旋转核模型，把其表面振动（液滴的特点）与单粒子激发（壳层的特点）结合起来。在 1950~1953 年，玻尔与莫特儿逊发展了他们的核模型，称为集体或旋转模型。这概念形成的基本点是：既形变又耦合单粒子态的核的旋转运动。当时，核物理学已相当程度被美国主宰，但玻尔与莫特儿逊的大多数工作发生在哥本哈根的玻尔研究所。那里一群核物理学家发展集体模型。哥本哈根物理学家获得核结构的有价值信息的方法之一，是利用库仑激发，这就是：用仅电磁地作用于核、不可能改变核的低能荷电粒子去轰击核，使其激发。这样或那样，哥本哈根团队系统地考察了核的旋转能态，并用其资料来确证与精细集体模型。玻尔与莫特儿逊为“他们在原子核的内部结构方面的工作”共同赢得了 1975 年的诺贝尔奖。这是迄今为止在核物理学的工作中最后一个奖项，反映了物理学领域的经典纪元在 1960 年左右达到高峰。

还有另一个诺贝尔奖授予了对理解核结构做出贡献的美国人罗伯特·霍夫斯塔特。他利用电子散射实验考察核的细节。原则上，这方法类似于盖格与马斯顿的经典的 α 散射实验，1911 年，

那实验导致卢瑟福的有核原子模型。用快速电子轰击核有这样的优点：废掉了对于核力的一切错误理解。从 1953 年开始，霍夫斯塔特用斯坦福大学的新直线加速器研究 116 MeV 电子从金属来的散射。3 年后，他得以利用能量为 550 MeV 的电子。他用一个巨大的特别设计的频谱仪考察散射电子，从资料推断核的密度如何随与中心的距离而变化。被其结果所鼓动，1954 年，霍夫斯塔特把他的方法应用于氢，发现质子的电荷分布。为了考察氘与中子的结构，他也考察了氘的电荷分布。因此，斯坦福实验不仅对于核物理学，而且对于基本粒子物理学也是重要的。结果表明：长期来假设的东西，质子与中子，是同一种粒子的不同侧面；而且，这粒子，核子，是一个虽无确定边界、却具有有限大小的物体。跟具有确定半径的重核不同，核子的电荷密度发现从中心光滑地减小，发现平均的、所谓均方根半径约为 0.74×10^{-15} 米。霍夫斯塔特把核子想象成被一个介子云所包围，介子在质子中相加，在中子中相消。如他在 1961 年末的诺贝尔受奖演说中所说，“质子与中子，曾被认为是基本粒子，现在看来是高度复杂的物体。”

现代炼金术

1934 年费米关于生产出比铀重的化学元素的猜想，曾被证明是无根据的。但 7 年后，元素 93 与 94 变成了现实。这仅仅是一个开始，它却是至关重要的。镎与钚的发现开辟了物理学与化学的一个新领域——嬗变元素的开发与科学。这个领域的公认领主是格伦·西伯格。他后来成为核能的一名辩护士。1961 年被任命为原子能委员会主席。早在 1944 年，元素 95 与 96 被芝加哥大学冶金研究所的西伯格团队发现，分别命名为镅与锔。镅界定为钚 241 的衰变产物，而锔则是在贝克莱回旋加速器用 α 粒子轰击钚 239 产生的。战争之后，原子序数从 97 到 101 的元素称为镅、



铜、镱、镥和钿（见表 19.1）。当然，头两个与最后一个是在回旋加速器中用被加速的 α 粒子“正常地”生产出来的。但是，镱与

表 19.1 嬗变元素的发现，1941 ~ 1961 年

原子序数	名称	符号	年份	地点	发现人
93	镎	Np	1940	贝克莱	麦克米伦，阿贝尔森
94	钚	Pu	1941	贝克莱	西伯格，麦克米伦，肯尼迪，瓦尔
95	镅	Am	1944	芝加哥	西伯格，詹姆士，莫尔干，吉奥索
96	锔	Cm	1944	芝加哥	西伯格，吉奥索，詹姆士
97	锫	Bk	1949	贝克莱	西伯格，吉奥索，汤姆孙
98	锿	Cf	1950	贝克莱	西伯格，吉奥索，汤姆孙，斯特里特
99	镱	Es	1955	贝克莱，等	西伯格，吉奥索等人
100	镥	Fm	1955	贝克莱，等	西伯格，吉奥索等人
101	钿	Md	1955	贝克莱	西伯格，吉奥索等人
102	镄	No	1957	斯德哥尔摩	阿特林等人
103	铹	Lw	1961	贝克莱	西伯格等人

注：这里的资料不能过于从字面上理解。化学元素的发现，即使是被生产出来的，都是复杂的事件，不能简单地归结于一些确定的日子与人名。

镥则是在 1952 年 11 月在埃尼威托克的热核爆炸试验之后收集到的残物中确认的。在洛斯阿拉莫斯和贝克莱考察残物的科学家们得出结论：各种同位素是捕获爆炸的强通量产生的中子的产物。在他们生产与鉴别新元素的工作中，贝克莱的科学家们成为微量分析技术专家，学会了操作被认为不可置信地少的微量物质。例如，铜的确认用了约 5 000 个原子。与钿的生成相比，甚至这个

数还是太大了，钋是在同不可量衡的——或许是化学史中的第一次——靶元素铋 253 打交道中产生出来的。

一直增加到元素 101 的发现的完全被西伯格领导的美国——更确切地说，加利福尼亚——物理学家与化学家所主宰。生产过程主要以 α 粒子轰击为基础。但是，加利福尼亚人并非在游戏中唱独角戏。例如，瑞士物理学家惠格·阿特林和他的合作者在诺贝尔物理研究所通过回旋加速器用被加速的氧离子轰击铀 238。在跟美国人的竞赛中，1954 年他们报道生成了元素 100。3 年后，一群美国、瑞典和英国的物理学家利用斯德哥尔摩回旋加速器生成强碳 13 离子 ($^{13}\text{C}^{4+}$) 流，并让它跟样品镅 244 反应。他们宣称发现了元素 102，建议把它命名为锺，理由明显。加利福尼亚的科学家不习惯搞发现游戏的竞赛，不能确认斯德哥尔摩的结果，怀疑元素 102 是否真的被生产出来。他们没有发现该元素，但用的是不同的方法。如西伯格 1959 年在《奋力》的一篇综述论文中所写的，“1958 年一个由吉奥索，T·斯克兰德、J·R·瓦尔顿和作者组成的团队在辐射实验室识别了同位素 102^{254} ……虽然，元素 102 的名字锺无疑必须更改，但在撰文的时候，考察者们并没提议用什么名字。”争论也涉及包括乔治·弗勒罗夫的一群前苏联科学家。他用氮离子轰击铀 238 生产了元素 102，并以此来质问美国宣称的优先权。与西伯格期待的相反，锺的名字最终被国际纯化学与应用化学联合会所采纳。

50 年代炼金术实验为这领域的进一步工作形成了构架。更多的“超铀”元素 ($Z > 101$) 的生成试验继续着，到 1998 年，20 种人造元素被承认“存在”，最重的是 $Z = 112$ 。现代炼金术较晚时期的主要玩家是：劳伦斯·贝克莱实验室、俄罗斯的杜布纳的核子研究中心，和德国的达姆斯塔德特的重离子研究协会。核物理学更多的先驱均享有以其名字给元素冠名的荣誉，这包括：卢瑟福 (Rf, 104)、玻尔 (Bh, 107)、和迈特勒 (Mt, 109)。元



素的原始生成大师格伦·西伯格的名字被授予了元素 106 (Sg)。化学元素一般不以在世的科学家的名字命名，但 1997 年国际纯化学与应用化学联合会举荐西伯格的情况为例外。

核能的希望与危机

核反应堆的基本理论在战争时期被费米、维格纳和其他人所发展，并在军事反应堆中被检验。1945 年以后，花大量工作来完善对于裂变过程的理解以发展一个核反应堆的详尽理论。到 1947 年，由于阿尔芬·温伯格与尤金·维格纳的权威著作《核子反应堆的物理学理论》的出版，物理学在这方面的工作已经完成。一种新型的工程师——核工程师，承担着核反应堆发展的二期事务。尽管在公众的眼中，他们是物理学家，而物理科学是密切相关于各种新的技术奇迹的。

最早的核反应堆，从 1942 年芝加哥的堆开始，是实验型的（表 19.2）。输出能量的反应堆，首先被英国、美国和前苏联的工程师们所发展。起初，以科学为基础的新型核工业发展缓慢，但从 60 年代中期起，发展速度急速增加。人们可能以为美国的政治与军事领导人看好新的能源，并利用国家在这领域的优势寻求建立一个民用的核能系统。然而，情况并非如此。核爆炸不被置于高度优先地位，美国对核能的兴趣开始是很有限的。美国拥有巨大的石油与煤碳资源，而且，美国公司也没有预见到核技术的巨大市场。世界上第一个商用核动力站不是建设在美国，而是在英国的卡德霍尔，它于 1956 年 10 月 17 日正式开始运作。这个反应堆是以哈维尔原子能研究机构的实验工作为基础的。该机构是英国的创新核研究中心，由约翰·科克罗夫特领导。一年多以后，美国人效法卡德霍尔在宾夕法尼亚州西坪坡建立了核电站，设计发电量为 10 万千瓦。花了一些时间后，美国的核工业才赶

上来。1966 年，英国仍然是世界上最大的核能生产国。其他的国家跟得更慢（表 19.3）。第一个苏联反应堆 1949 年准备就绪，5 年后，前苏联的科学家与工程师建造了国家第一个核电站——名义上的核能利用，因为发电量只有 0.5 万千瓦，只能说是半实验性的。

表 19.2 早期反应堆的选择（1942 ~ 1954）

国家	地点	开始时间（年）	减速剂	功率（千瓦）
美国	芝加哥	1942	石墨	0.2
美国	奥克里季	1943	石墨	2 000
美国	芝加哥	1943	重水	300
英国	哈维尔	1947	石墨	100
加拿大	查克河	1947	重水	10 000
英国	哈维尔	1949	石墨	6 000
前苏联	莫斯科	1949	重水	500
美国	布鲁德哈芬	1950	石墨	28 000
挪威	奥斯罗	1951	重水	300
法国	萨克里	1952	重水	1 500
美国	爱达荷	1953	（无）	1 400
前苏联	阿布宁斯克	1954	石墨	30 000

注：所有反应堆或多或少都是试验型的，并且，除一个例外，都是异热型的。这例外是 1953 年的爱达荷的反应堆，它是一个快供器，用了 90% 的浓缩铀，没有减速剂。最后一行给出的功率是热功率。

最初，美国对核能的兴趣局限于军事应用。就反应堆而言，它就是指海军的核动力潜艇工程。就在进行这项工程期间，建造了生产大量电力的反应堆。称为马克 1 号的反应堆于 1953 年春开始运转。在海军上将海曼·里科弗的领导下，海军工程突飞猛



进，导致 1955 年世界上第一艘核动力舰艇“鹦鹉螺号”下水。2 年后，一艘半民用船，前苏联的破冰船“列宁号”，继“鹦鹉螺号”之后下水。后来，少数商业运输船装备了核反应堆。不过，关于铀动力世界船队的光明希望甚至从来就没有开始实质化。在海洋上，利用核反应堆主要局限于大潜艇上。海军所喜欢的

表 19.3 1954 ~ 1978 年，核能主要用户核能电力的增长 单位：GW

	1954	1960	1966	1972	1978
美国	0.002	0.482	1.91	14.83	91.71
英国	—	0.414	2.97	4.50	10.95
法国	—	0.08	1.17	2.71	5.58
前苏联	0.005	0.305	1.02	2.62	10.01
西德	—	0.015	0.33	2.33	13.51
加拿大	—	—	0.23	2.00	5.52
日本	—	—	0.17	1.74	19.32
意大利	—	—	0.60	0.60	1.39
印度	—	—	—	0.58	1.18
瑞典	—	—	0.01	0.45	5.58
世界总量	0.007	1.296	8.41	34.74	184.91

反应堆类型是普通的，或“轻”水型。这种类型具有一些确定的优点，而且，因为它可造得相对的小和紧凑，很适合于里科弗计划的潜艇与航空母舰。这是后来轻水反应堆主宰民用市场的一个重要原因。美国核工业的突破是在肯尼迪政府时期。1963 年在奥斯特克里克开启了一个 64 万千瓦的沸水反应堆。这是由杰西通用动力与光学公司订购、由通用电器公司生产的。同年，由维斯廷豪斯建造的、57 万千瓦的康涅狄格州的杨基高压水反应堆开始运转。70 年代，许多反应堆从这两家公司引进

到欧洲与非洲。

直接或间接地，核武器继续是美国物理学发展的一个极其重要的因素。战后不久，关于在和平时期如何组织核研究，特别涉及军事在新组织中的作用，以及如何使国际责任与国家的防卫目的一致，有着许多讨论。在这些讨论中，许多物理学家和其他的原子科学家是积极的，形成了一个“科学家运动”。其目的之一是开发可控核能的民用功能。他们的杂志《美国科学家公报》成为讨论科学政策以及讨论关于增长着的物理学军事化的伦理后果的一个重要期刊。然而，在物理学家之间没有任何一致意见，远远形成不了一个针对军事影响的统一战线。例如，强调核与原子研究对于军事的重要性的 1945 年原议案被劳伦斯、费米、阿瑟·康普顿与奥本海默所认可。然而，政治辩论的结果导致了 1946 年原子能法案。按照这法案，建立了原子能委员会（AEC）。

AEC 是一个有效力的民间组织。它从军方继承了大批实验室与设施。虽然 AEC 的建立广泛地被认为是关于原子事务的民用兴趣对军用兴趣的胜利，实际上，大多数早期的 AEC 研究仍继续为军方服务。AEC 迅速成为美国物理学家的最重要赞助者之一，虽不是最大的。1949 年，AEC 和国防部（DOD），比例约为 2:3，共同提供了大学物理科学联邦研究经费的 96%。在大多数物理学家中，军方与民间联合支持物理学没有引起什么关注。对他们来说，钱就是钱。

在曼哈顿工程期间，聚变或氢弹的可能性就已经被考虑，爱德华·泰勒曾特别为此辩护。早在 1941 年，费米曾有过利用铀弹触发激烈的核聚变的思想。1946 年春，专门召开了一个热核炸弹可能性的研讨会，得出结论：“制造出一颗超级炸弹并使其生效，是具有可能性的。”（Rhodes 1995, 255）可是，这项目没有给予优先地位，1946 年晚些时候，在洛斯阿拉莫斯的聚变研究停止了。只是由于 1949 年前苏联的核爆炸，泰勒关于热核“超级炸



弹”的建议，得到劳伦斯和贝克莱的阿尔瓦瑞兹的支持，才被认真的考虑，并且，获得了政界的支持。1949 年秋，有影响的 AEC 的普通科学咨询委员会（GAC）建议不要搞氢弹。大多数人，包括奥本海默、康纳特、和李·杜布里吉（一名物理学家，加利福尼亚工学院院长），从伦理与政治角度认为氢弹是不必要的——的确，不需要——因为“它的使用会涉及一个屠杀大量平民百姓的决定”。费米和拉比，虽然签署了他们少数人的附件，同意拒绝他们认为是“对于作为一个整体的人类的危险东西”，并且，“在任何角度看，必然是一桩罪恶的事情，”他们写道，“基于任何伦理的考虑，超弹不可能是正义的。伦理给予一个人具有其个体性与尊严，即使他是敌国的一个居民。”（Badash 1995, 83）早在 1946 年，阿瑟·康普顿就劝告“这项发展不应该实行，主要因为我们偏爱于不惜以巨大人类灾难为代价赢得战争的胜利，这灾难是被其果断地使用造成的”（Rhodes 1995, 207）。

有其他的更有力的声音，特别是泰勒的声音，他狂热地为热爆炸计划辩护。不奇怪，在冷战开始时，他的声音传到许多政治家，也传到将军与海军上将们的耳中。有争议的 GAC 的举荐报告不被接受，并且，1950 年，杜鲁门总统授权试制一颗聚变超级炸弹。许多美国最好的物理学家，包括某些曾反对氢弹的人（如奥本海默、贝特与费米），现在集体地从事于努力寻找一种如何制造炸弹的方法。基本的想法是：利用由一颗裂变弹产生的巨大热量引发一团氘与氚的聚变。有一段时间，这看来近乎不可能。但在 1951 年春，泰勒与数学家斯坦尼斯劳斯·乌拉姆从裂变弹中发现一种把辐射压集中的方法，这方法可使聚变燃料被压缩与加热。据说，当他得知这个被称为辐射耦合的解决方案时，奥本海默很感动，因为它“在技术上是如此的甜美”（Kevles 1987, 378）。由于理论的这一突破，洛斯阿拉莫斯的工作如期进行，并且，到 1952 年，一个叫做“迈克”的热核试验装置准备就绪。

1952年11月1日在太平洋中的埃尼维托克岛上成功爆炸。经过一年半的努力，“迈克”已经发展成一枚可由飞机携带投放的实际炸弹了。结果就是1954年3月1日爆炸的“亡命徒”。其摧毁力是可怕的，相当于15兆吨TNT，或者，比1945年的广岛原子弹大1000多倍。

氢弹，主要为政治目的而发展，是美国科学与工程功绩，但对于美国的世界政治来说，就不怎样了。1949年，前苏联爆炸了它的第一个核装置，跟美国1945年的三位体试验相当。与那一样，用的是钷。在很大程度上，就是这颗炸弹，助长了美国人决心努力发展一种威力更大的炸弹，从而取得冷战中决定性的优势，当时优势已经取得，虽未宣布，后来被承认是一种现实。但是，优势是短命的。在新的军备竞赛中，前苏联很快跟了上来：首先于1953年8月，试爆了一个热核试验装置；接着，于1955年用飞机投放了一颗氢弹。其威力估计是几百万吨TNT，比美国的小，但它是一颗超级炸弹，而这证明只是一个开始。最大的人造爆炸是1961年实现的，那是前苏联在试验一种新型的氢弹，爆炸力是580亿吨TNT。

受控聚变能

有了在氢弹方面的工作，自然要研究和平利用聚变能的可能性问题，目的在于发展一种类似于裂变反应堆的聚变反应堆。沿这一方向的最初努力，是把热等离子体禁闭在一个磁场中。这不是由氢弹而是由热核反应的贝特理论激励的。早在1938年，两位美国应用物理学家阿瑟·康特罗维兹和伊斯特曼·雅科布斯试图在一个禁闭在超环面内的稀化氢气中获得聚变。不奇怪，他们失败了。在曼哈顿工程的后期，核聚变的可能性曾被讨论过，但只到1951年，在AEC的领导下，它才转变为一个实际的研究计



划。这计划称为舍伍德项目，许多大型美国物理学的核心实验室参与该计划。在 1952 ~ 1958 年，举办了 8 次舍伍德学术讨论会。舍伍德的最大的参与者有：洛斯阿拉莫斯（有 46 名物理学家参加过一次与多次舍伍德会议）、普林斯顿大学（有 41 人）、加利福尼亚辐射实验室（有 86 人）和奥里斯季国家实验室（有 22 人）。舍伍德是大科学，而且是昂贵的科学。1953 ~ 1956 年 AEC 的主席，列维斯·斯特劳斯，是受控核聚变的强有力的辩护士。他深信这计划是会成功的，但要提供足够的资源，钱是没有问题的。从 1954 年到 1958 年，斯特劳斯增加了对聚变计划的投入，从 110 万美元上升到 292 万美元。“确实，这项工作不缺金钱，”斯特劳斯在 1956 年的一个报告中谈到，“事实上，在参观各个场所之后，人们得到一种感觉：每一个想法可得到的美元数目大得惊人。花费到手的这么多的钱肯定感受到一种压力。”（Bromberg 1982, 44）在美国，受控核聚变的先驱是李曼·斯皮泽，一名在氢弹项目中非全日工作的天文物理学家，他的天文物理学研究使他成为等离子体物理学的一名专家。

受控聚变能的思想是简单的，即：设法用磁场禁闭一团热而重的氢等离子体，并把它加热到几兆度，足以使聚变过程以合理速率发生。在早期阶段，主要问题被认为是：（1）加热等离子体；（2）维持聚变过程，就是说，使等离子体释放的能量至少足以维持温度不变；以及（3）把等离子体限制在稳定的状态之中。斯皮泽提议使用氘-氚反应 $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$ ，这比导致 $^3\text{He} + n + 3.2 \text{ MeV}$ 或 $^3\text{H} + ^1\text{H} + 4.0 \text{ MeV}$ 的氘-氘反应更容易达到。前述反应的一个缺点是用到了氚，它在自然中是不存在的。但在有较大能量输出和持续过程所必要的较低点燃温度条件下会有较多的质量超出。对于氘-氚过程，点燃温度约为 450 万 K；而对于氘-氘过程，点燃温度是约为 4 亿 K。

美国用不同方式攻克等离子禁闭问题。我们只提到早期阶段

最喜欢的、称为仿星器的技术方案。理论上，斯皮泽证明：扭曲成8字形的超环面（一种仿星形管），配备以载外电流的线圈，就会提供适宜于禁闭等离子体的轴向磁场。这个仿星器项目于1951年开始，主要在普林斯顿大学进行。仿星器历经多次修改，随着物理学家们获得更多的知识，设计逐渐地得到改进。到1954年年末，斯皮泽与他的团队准备好了一个全尺寸的仿星器的一般设计（称为模型-D），一个长为500多英尺的机器，在约为2亿K的温度下运作。总投资估计近10亿美元，判断该机器能产生5GW的净电力输出。

可是，事情并没有走到那种地步。1954年，泰勒认为：对于大电流，仿星器会出现各种不稳定性；而且，从1955年起的实验证实了他的预言。模型-D的工作停下来了。决定从较小模型中积累经验，以求找到稳定等离子体的方法。通过改变几何形状，证明这条路可行，但只是就某种程度而言。然而，从1956年起，仿星器项目已处于一种不确定的状态，如果不说是危机的话。尽管许多困难，耗资的项目在一种多少人为乐观的氛围中继续着。1957年的工作始于模型-C仿星器的设计与制造，设计达到10亿K的温度。在当时，官方的态度仍然是乐观的。阿马沙·比绍普，一位高能物理学家，从1953年起就是负责舍伍德项目的AEC成员。关于仿星器计划，他写道：“大量的实验困难继续困扰着工作的进展；可是，有理由相信这些困难能够与将会被克服。”关于作为一个整体的舍伍德项目，“由于足智多谋、勤奋工作和稀稀拉拉的好运，似乎甚至有理由希望一个全方位的产出电力的热核装置可以在未来的一二十年内建成。”（Bishop 1958, 167 and 170）归根结底，仿星器只是把等离子体维持在正确条件下的方法之一，或许，好运就降落在仿星器上。这项目继续着，直到60年代末，但从没有产生出人们所期待产生的东西来。那时，一个新的概念，叫做托卡马克（受控热核反应装置），



首先由俄罗斯所发展，开始看来有较好的前景。因此，普林斯顿的物理学家把他们的仿星器项目改为托卡马克项目。约 1970 年，全世界转向托卡马克，被说成聚变研究的范式转换。

1955 年在日内瓦召开的和平利用原子能的国际学术会议上，霍米·巴布哈，印度物理学家与他们国家的原子能委员会主席，以不如比绍普乐观的口气说到未来的能源：“技术困难是可怕的，但是……我敢预言在未来的 20 年内会找到一种以可控方式释放聚变能量的方法。当那发生时，世界的能量问题将会真正地永远地解决了，因为燃料如海洋的重氢一样的丰盛。”（Bromberg 1982, 67）受控聚变为人们所关切的一个原因是：它可能是一种现实不可穷尽地廉价提供的能量。甚至在 50 年代，能量危机尚未形成，人们就认识到化石燃料资源是有限的，铀形式的核能不可能是对于日益增长的能量消耗的最终解决办法。巴布哈的讲话是物理学家首次公开谈论受控聚变中的一次。美国的聚变计划是保密的，舍伍德项目本身就是高度机密的。在其他国家也有类似情况。保密的一个理由是受控聚变会提供的强中子源的军事意义。可是，1956 年决定：对这项工作保密既无军事理由又无政治理由。到 1958 年第二次日内瓦会议时，美国把它的大部分工作解除了保密级别，公开了受控聚变中关于仿星器与其他概念的信息。

美国不是试图发展受控聚变的唯一国家。在英国，乔治·P·汤姆逊早在 1945 年，就想到一种可能性，第二年，他拟订了一份关于用交流电加热氙气的装置的专利申请。汤姆孙的想法是一种“替代”效应仪，在其中，禁闭等离子体的磁场不是外加的，而是被等离子体电流本身提供的。英国聚变试验，利用汤姆孙的思想以及牛津大学彼特·托尼曼的思想，起步于 1949 年，比美国的相应工作早。他们的结果是：ZETA（零温热核仪），一个充满稀薄氙气的装置，被 10 万安培以上的脉冲电流点燃。1957

年，当 ZETA 首次运行时，从等离子体那里获得大量的中子，估计其温度至少有 1 亿 K。这是一个有希望的结果，但不能确认中子真的来自于热核，从而聚变已经达到。1958 年，证明大多数中子不是热核的，ZETA 的命运跟仿星器一样。虽项目没有白费，但这两者都失败了。

尽管耗在受控聚变过程的许多资源没有创造出一座聚变反应堆来，它们却创造了一个新的科学共同体。等离子体物理学是一个比聚变更长久更广阔的主题。该领域的研究是 20 ~ 30 年代进行的，当时朗缪尔开创了等离子体实验，朗道开创了等离子体理论。可是，在该领域的研究是零乱的，而且仅限于低温等离子体。经典等离子体研究与新的、高温的磁等离子体物理学的结合，使等离子专业变成了科学的一个分支学科。在 1958 年日内瓦会议之后，美国、英国与前苏联研究人员之间解除保密状态，并开展自由交流，提供了形成国际等离子体共同体的条件。如前苏联物理学家列夫·阿兹莫维奇在 1958 年日内瓦会议上所说的，“这个问题 [受控聚变] 似乎是，特别为发展按一个共同的计划工作与继续发展而不断改进其计算、实验和工程的各国科学家与工程师之间的合作，而创造出来的。”（Post 1995, 1640）随着保密级别的解除，大量出版物如雨后春笋，它们原先是保密的。现在，聚变研究者开始在正常的物理杂志，如《物理评论》以及新创办的《流体物理学》，或前苏联的《原子能》上发表文章。此外，他们有国际原子能机构（IAEA）创办于 1960 年的期刊《核聚变》，刊出英国、俄罗斯、法国和西班牙的文章。新情况迅速导致大学的新课程和高温等离子体物理学研究生计划，同时，在物理学的这个领域中博士人数日益增长。在美国，等离子体物理专家由 1960 年的 14 人跃到 1963 年的 99 人。他们中许多来自普林斯顿大学，在那里，1958 年等离子体物理学已成为最大的研究计划。新领域力量的另一个指标是：在美国物理学会内，创立了



等离子体物理学分会。从任务秘密定向的计划向正常的科学分科的转变，意味着，等离子体物理学家所采用的方法与标准的一种变化。工程的、有时称为试错法的进路让位于更系统的与更严格的方法；跟其他的学术物理学分科所采取的相一致了。当然，敬重科学的过程不是一路坦途的。有些物理学家对于新学科投以怀疑的眼光。有段时期，等离子体与聚变研究学术名声不高，部分原因是它继承了严重依赖于工程方法的经典项目。

在汤姆孙和斯皮泽首先想到如何获得聚变能之后，物理学家们花去了40年的时光与数十亿美元的巨资继续在努力发展一个产出电力的装置。到1990年，因为其禁闭等离子体的卓越能力，托卡马克仍被认为是最有希望的聚变动力概念。当时，最大的机器是TFTR（托卡马克聚变试验反应堆）与欧洲的JET（联合核子环）。80年代末，这两部机器都达到了禁闭品质——产生的等离子密度与在泄露前能量维持在等离子体内的时间—— 1.5×10^{20} 秒/米⁻³与20 keV（对应于约15亿K），这些是接近临界水平的条件。在临界水平上，产出的电量多于所使用的电量。作为替代磁禁闭的另一种方法，旧有的替代效应技术改进，而且，在90年代被大大地发展了。有希望的结果使一位美国物理学权威与工程师得出结论：“如果我们不久就开始下一个大步骤[4亿美元X-1机器的设计与制造I，我们真的认为我们可以在10年内干好这工作。”（《科学美国人》1998年8月27日）然而，在千年之末，生产动力的反应堆没有实现，商用的聚变电力依旧是个未来的梦，或许，甚至更遥远的梦。

第二十章 | 军事化与大趋势

物理学——一个军事分支

“对于美国科学与科学家来说，第二次世界大战在许多方面都是一个分水岭。它改变了科学事业的本性，根本改变了科学与政府……军事……工业之间的关系。”（Forman 1987, 152）1984年杰罗尔德·扎恰里阿斯这样写道，他是一位极富军事项目和科学政策经验的、50年代的大物理学家，他认为对科学投资的结构和规模的变化，可以说是以战争为分水岭。战前，这些投资是微不足道的。美国基本物理学研究经费总共约为100万美元。1953年联邦政府分配给基本物理学的总经费估计约为4 200万美元，或者，折合成1938年的美元是这个数的一半。因此，在这期间，联邦政府对于基本物理学的实际投资的增长不低于20倍。此外，还有洛克菲勒基金与其他慈善机构的捐赠，但是，在一个以联邦政府的强力支持为主的时代里，这些传统的赞助来源变得没有多大意义了。

在50~60年代，联邦经费在很大程度上是军事经费的同义词，或者，是从国防部和民间（但实际上，是军事定向的）原子



能委员会来的经费。图 20.1 给出 1935 ~ 1985 年军事研究与发展 (R&D) 开支的变化概貌。注意: R&D 是比科学广泛得多的范畴, 而科学又比物理学广泛得多。应注意的要点是: 军事研究的规模, 以及它构成政府投资总量的大部分。当然, 投向物理

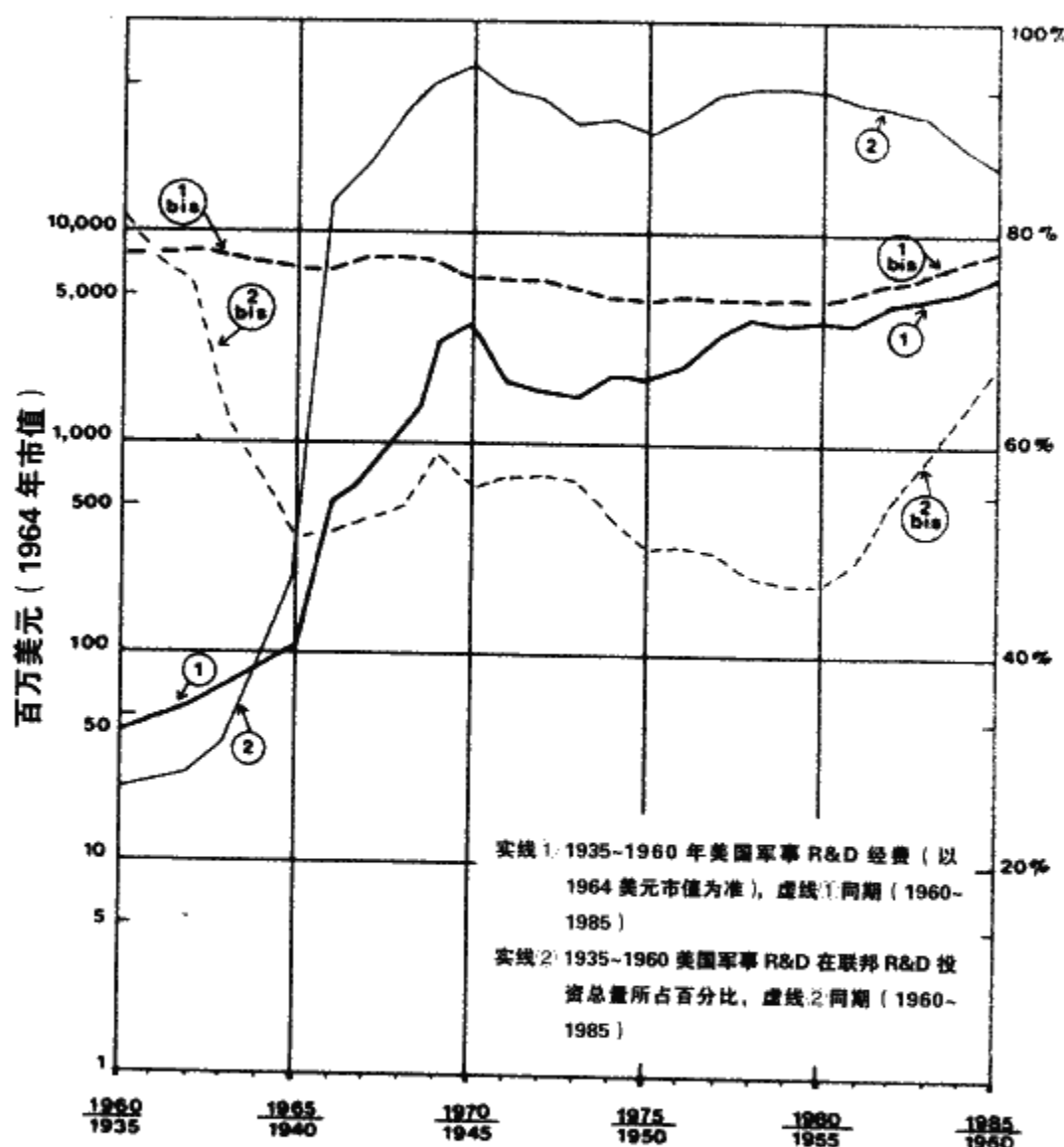


图 20.1 1935 ~ 1985 年间美国军事 R&D 经费的发展, 为了便于比较 1935 ~ 1960 与 1960 ~ 1985 两个期间的情况, 此图是个折叠图。

来源: © 1987 by Regents of the University of California.

学的经费只是总经费的很小一部分，但它却是美国物理学，从而是世界物理学的实质部分。约在 1950 年，大学物理学家的全部研究时间的 70%，花在由 DOD 或 AEC 赞助的研究课题上。在同一时间，政府用于学术物理学的 2 200 万美元，有 98% 来自于 DOD 或 AEC。由于国家科学基金（NSF）的出现，上述百分比下降了，但不是大幅度下降。1960 年，它降到 92%。联邦政府对基本固体物理学的支持数字，说明了一般的投资结构。1953 年，该领域接受了联邦政府 310 万美元的支持，其中来自 NSF 的只有 1 万美元。两年后，支持增加到 450 万美元，其中 380 万美元来自军方，60 万美元来自 AEC，10 万美元来自 NSF。军方分配给陆、海、空的比例是：7:6:5。不论怎样，战后的头两个十年，美国物理学经费的主要来源都是相关于军事系统的。

毫不奇怪，有些物理学家认为他们的科学危险地变成了军事的一个分支。1946 年，曼哈顿工程的一位年轻的物理学家菲力普·莫里逊，说出了他的担心，他注意到“加利福尼亚大学在贝克莱物理学上每花 21 美元，就要花在军事上 7 美元。……有的学校 90% 的研究费是从海军那里获得支持的”，莫里逊所担心的物理学被军事化的景象，但同时，他意识到他与他的同事们的两难处境：“物理学家知道处境是错误的与危险的，他被迫跟着走，因为他实际需要钱。不仅战争教会他如何努力得到有力支持，如何能够极大地增加他工作的有效性，而且，他的领域不可能再为小群体的事务所局限了……他需要大学之外的各种力量的支持。如果 ONR [海军研究办公室]，或者，新的陆军研究办公室，G-6，来订一份好的合同，那么，他肯定是绝不会拒绝的。”（Morrison 1946, 5）于是，经过思考再三，莫里逊主张 NSF 应该取代军方成为物理学的主要赞助者。

在很大程度上，NSF 的宗旨是基于范尼瓦·布什 1945 年的报告《科学，无边界的前沿》。在这篇有影响的著作中，布什力主



“与陆军与海军有密切关系、被民间控制的组织，但其基金直接来自于国会，有能力开拓军事研究，补充与增强那些在陆、海军直接控制下实施的研究。”（Schweber 1989, 676）不过，当1950年NSF问世时，它的资源很有限。因此，开始时它相对地无足轻重。直至1972年，国会通过了曼斯菲尔德修正案，情况才有了很大的变化。根据该法案，应限制军方在军事相关的项目的研究努力上，放弃其在基础研究方面的扩张。虽然法案符合那些抱怨军方在民用科学中起作用的物理学家的愿望，但他们是少数，没有多大的影响。由于朝鲜战争的到来，批评的声音大大地沉默了。许多一直批评军事控制的物理学家，现在接受了局势的需要，准备为军方工作或接受它的钱。

在1957年所谓人造地球卫星的震撼之后，军事、国防工业与物理学家之间的纽带进一步增强。同年，艾森豪威尔总统建立了一个新的白宫机构，总统科学咨询委员会，麻省理工学院校长詹姆斯·基里安为委员会主席。基里安的委员会是被物理学家任命的，他的继承人肯尼迪总统的科学顾问杰罗梅·维斯纳的委员会也是如此。基里安与维斯纳都经过物理学与工程学的训练，与军方关系密切。1958年，国家航天与航空管理局（NASA）的建立为物理学创造了新的优势。冷战加上空间和导弹竞争为物理学创造了独特的机会，在许多情形中，他们现在可以选择军事（DOD）、民间（NSF与NASA）以及亚民间（AEC）的日益扩展的项目基金。60年代，美国物理学家在经济、社会以及科学上都处于世界的顶峰。克夫列斯这样生动地描绘了热心科学的一般氛围和无限的技术乐观主义：“它是一个这样的时代：美国人把核物理学家排在仅次于高等法官和医生的第三职业——他们在1949年排在第14位；物理学家与其他科学家一道不仅被等同于炸弹与火箭的制造者，而且是喷气飞机、计算机和直拨电话，以及半导体收音机与录音机和彩电的先驱；加利福尼亚大学校长克拉

克·克尔称之为“知识工业时代”的研究与发展，认为它产生着无限的经济扩张。”（Kevles 1987, 391）

物理学家在经济上的确被娇养。1958年，美国物理学家人数是12 702人，两个大领域——核物理学（2 622人）和固体物理学（1 926人）。单凭这个数字不足以说明物理学共同体给人的印象。同年，美国拥有35 805名化学家与18 015名生物学家；即使地球科学也有13 071名地质学家，比物理学的科学家还多。但是，尽管化学家几乎是物理学家的3倍，化学家获得联邦政府的研究资金支持只有物理学家的一半。每位物理学家接受资助的平均数是11 000美元；而化学家的相应数是1 900美元，生物学家是4 900美元；在地质学与数学中，分别是1 800美元与1 700美元。

军方的支持不限于直接——或者非直接——相关于战争领域，而是覆盖一切物理学，包括那些似乎根本无军事意义的领域。大量的学术会议、图书馆、暑假补习班以及各种研究项目，全部或部分地得到军事机构的支持。这个系统不久迅速地发展到整个工业，成为物理学家日常生活的一部分。举一个表面看来是严格非军事领域的军事物理学研究的例子，我们说一说俄亥俄州以约舒亚·哥尔德伯为首的赖特-帕特逊空军基地的航空研究实验室（ARL）。1956年ARL启动了一个巨大的广义相对论研究与支持纲领，它在当时是一个比今天还要深奥与无用的数学物理分支。在它存在的16年里，这个纲领——它后来被曼斯菲尔德修正案砍掉了——在复苏广义相对论中起着重要作用。例如，它支持了约翰·惠勒、厄曼·邦迪、帕舒尔·约丹、菲里克斯·皮拉尼、罗伊·克尔和阿尔弗雷德·什尔德等顶尖理论家。作为它的学术活动，ARL与军械研究办和NSF联合支持了1957年查帕山“引力在物理学中的作用”学术会议，这包括用空军飞机将欧洲的与会者从欧洲运到美国。在以后的几年里，ARL组织了更多的学术会议，赞助美国与外国的理论家，并跟许多大学



签订合同。从纲领派生出来的工作在科学上是重要的，但跟军事几乎挂不上钩。ARL 报告的典型标题是《协变场论的量子化》（彼特·伯格曼）与《对广义相对论的种种贡献》（约丹）。

最重要的早期军事科研基金机构或许是 ONR，1949 年它鼓吹“海军部庞大的大学研究纲领是学术界与政府之间历史上和平时时期最大的合作事业”。利用近 2 千万美元的总开支，“近乎 3 000 名科学家，2 500 所学院以及大学的研究生积极投入到海军极感兴趣的许多领域的基本研究项目之中。”（Schweber 1988，17）1950 年，ONR 的经费不及海军全年研究与发展经费的 5%（约为 18 亿美元），但仍比 1940 年总数 890 万美元的两倍还多。换言之，在 10 年的区间内，海军在研究与发展上的经费难以置信地增加了 20 倍。ONR 大量活动中的一项是提供 MIT 的核科学与工程实验室基金，1951 年的预算约 120 万美元。ONR 也主办学术讨论会、暑假补习班，1950 年的“哈特维尔项目”研究是一个典型例子。这是一个 MIT-ONR 联合项目，由核科学与工程实验室主任扎恰里阿斯领导。它的目的是研究海底战争，包括同战术核武器的协作。短暂而高强度的工作吸引了国家最有能力的一些物理学家，包括路易斯·阿尔瓦瑞兹、罗伯特·狄克、菲力普·莫尔斯、查里斯·劳里森、爱德华·佩塞尔和杰罗梅·维斯纳。它是在当时以及贯穿 20 世纪后半叶进行的许多类似项目中的一个。它的重要性在于：许多卓越的物理学家卷入到早期防卫项目之中，并且，以这种方式向大范围的物理学共同体发出邀请，这样的项目同时兼有巨大科学价值与学术重要性：连诺贝尔奖得主和大师级的物理学家都参加的一个军事项目，你敢小看它吗？海军与其他军种漂亮而成功地实施着他们的战略。要说出一个重要的物理学家一直拒绝参与任何军事项目，是相当困难的。从 1950 年起，30 名诺贝尔奖得主从 DOD 那里得到直接的支持，参与防卫定向的工作很快成了可接受的事务，甚至被认为是一种学术

品格。

美国不是动员物理学为冷战服务的唯一国家；前苏联也是这样做的。为了科学与军事的理由，对于美国及其西方盟友来说，知晓前苏联实验室内发生的事情，是很重要的。当时苏联大多数非经典研究一概以俄语发表，仅此一点，就给西方科学家造成极大的困难。1955年，美国物理研究所在NSF赞助下启动了一个翻译苏联期刊的计划，帮助西方科学家能及时地了解前苏联的最新发展。到1959年，9份前苏联期刊被全部翻译完毕，共有13 000页。翻译的期刊种类包括：理论与实验物理期刊，评论期刊，苏联科学院文献汇编的物理学部分。

大规模赞助物理学有什么效果呢？首先，它不仅导致应用物理学，也促成基础物理学的实际成长。美国作为世界的领导的地位被强化了。其次，除了军方兴趣对于物理学的规模、组织和优先权的影响外，它还影响到研究中的物理学以及物理学家对于其科学的态度——，叫“科学事业的本性”。用扎恰里阿斯的话来说。有些科学家提示：在这期间，存在一种趋向工程方面与应用物理学的一般倾向，正是这种物理学是军方的兴趣所在。军事精神甚至体现在理论的深层内涵中。鉴于实用的理论化并非战争的一种发明，甚至在30年代它就是一个特征了，人们可以宣称：物理学卷入军事项目之中，强化了一种业已存在的趋势，把它转化为一种世界范围的模式。不论这断言的有效性如何（那是难于确认，更难于检验的），美国物理学家对于那些很可能具有军事意义的领域，包括电子学、仪表学、核物理学和原子物理学，十分感兴趣，却是一个事实。这些领域受到联邦政府的巨额赞助。例如，1953年，联邦政府大学物理非经典基础研究基金的64%被分配给广义的核物理学；固体物理学10%；宇宙射线6%；原子物理学5%；低温物理学1%（第二十一章表21.4）。

下面的描述只涉及到美国，这里军事-物理关系的历史发展



一直是许多精细研究的主题。致力于欧洲与前苏联相应关系的历史著作是少得可怜的。无疑，美国的情况具有特别重要的意义，不仅因为这关系更密切以及具有欧洲所不知晓的规模，而且，因为美国是西方世界政治、军事与科学的领导者，在前苏联，物理学与军事之间的关系无疑更为密切，但是，迄今为止关于这两者之间的相互作用，人们知之甚微。在欧洲某些国家特别是法国与英国，军事也起重要作用，但这种作用不如美国那样重要。而在少数欧洲国家中，军事根本不起作用。

在欧洲和在美国的科学系统中，军方起着不同的作用，世界科学的这两个主导地区在第二次世界大战之后十年间的发展是十分不同的。欧洲物理学相对落后的一个重要原因不只是因为欧洲国家比美国贫穷得多。1950年，一个美国核物理学家参观意大利的物理学机构时，注意到：这些机构全“都因缺研究资金和物理学家工资低下而大受影响”。他在文章中报道说意大利为之骄傲的罗马大学的物理实验室年预算只有2万美元，“对于任何一个与之相当的美国大学来说，这笔经费显然少得可笑。”（今日物理，1951年元月）然而，两个物理学世界在产出率与品质方面的差别，不能只归结于经济上的原因，主要（或更多）的原因植根于不同的心理、文化传统与教育制度上。这是一名法国物理学家安德瑞·久尼尔1947年从2个月的造访美国实验室归来时所清楚地认识的，在对美、法两国的分析中，他指出：美国物理学家从事专业工作的年龄较早，而法国有一个不利于产生科学结果的“非专门化的尝试期”。“真正的困境是在具有深奥而有限知识与较浅而广博知识之间作出抉择，”他写道，“美国人跟我们不同之处就在这一抉择上，我们总认为一般文化优越。但是，我们常常忘记承认它是表面的。”久尼尔深深为其在美国实验室所见到的不讲究形式的亲热氛围所感动，并把它视为美国物理学成功的一大原因：“白领与蓝领之间，关系十分和谐，青年工作人员直呼

其老板的名……在这一点上，人们不得不羡慕美国的制度：权威不是来自等级地位，而是来自竞争，这是科学工作所不可缺少的，这种氛围使工作中合作成为可能，在美国不是两人或更多人共同署名的科学论文很少。有许多著作是由许多大实验室的全体人员纂编的……在法国，基本上没有一个团队取得过如此的成功。”（《今日物理》，1950，5月）

大机器

对于“大科学”来说，巨额经费不但是一个充分条件，而且是一个必要条件。因此，不奇怪，物理学的大科学时代是跟政府基金的增加相吻合的。然而，需要指出的是：大科学不仅仅是规模与经费问题，也不纯粹是一种战后现象。第谷·布拉赫天文台（1580年）、马提努斯·范马努姆静电机（1784年）和罗斯-厄尔巨型望远镜（1845年），相对于当时可获得的经费来说，是非常巨大和特别昂贵的。但是，它们的情况只是例外。只是在20世纪上半叶起，大科学仪器和实验室才开始影响科学的进程。早先，作为一个例子，我们提到过莱顿的凯末林·昂尼斯的低温实验室，以及作为战后大科学物理学先驱的30年代劳伦斯回旋加速器。这些机器激发团队工作，提升了对于外部基金的需求，并且，它们导致一种对于所谓的成功新科学的态度。这些关于科学的内、外因素的变化，不是规模本身，使大科学成为一种重要现象。虽然，战后大科学远不限于物理科学——例如，它在天文台中也起着类似的作用——不过它的最为醒目的发展，是表现在加速器和高能物理学使用的其他仪器中。不打算再详细介绍其发展的全貌了，我们只是提及几个较突出的机器和实验室使这发展具体化。图20.2所示为80年代中期之前加速器能量的增长情况以及各种不同的加速器家族。

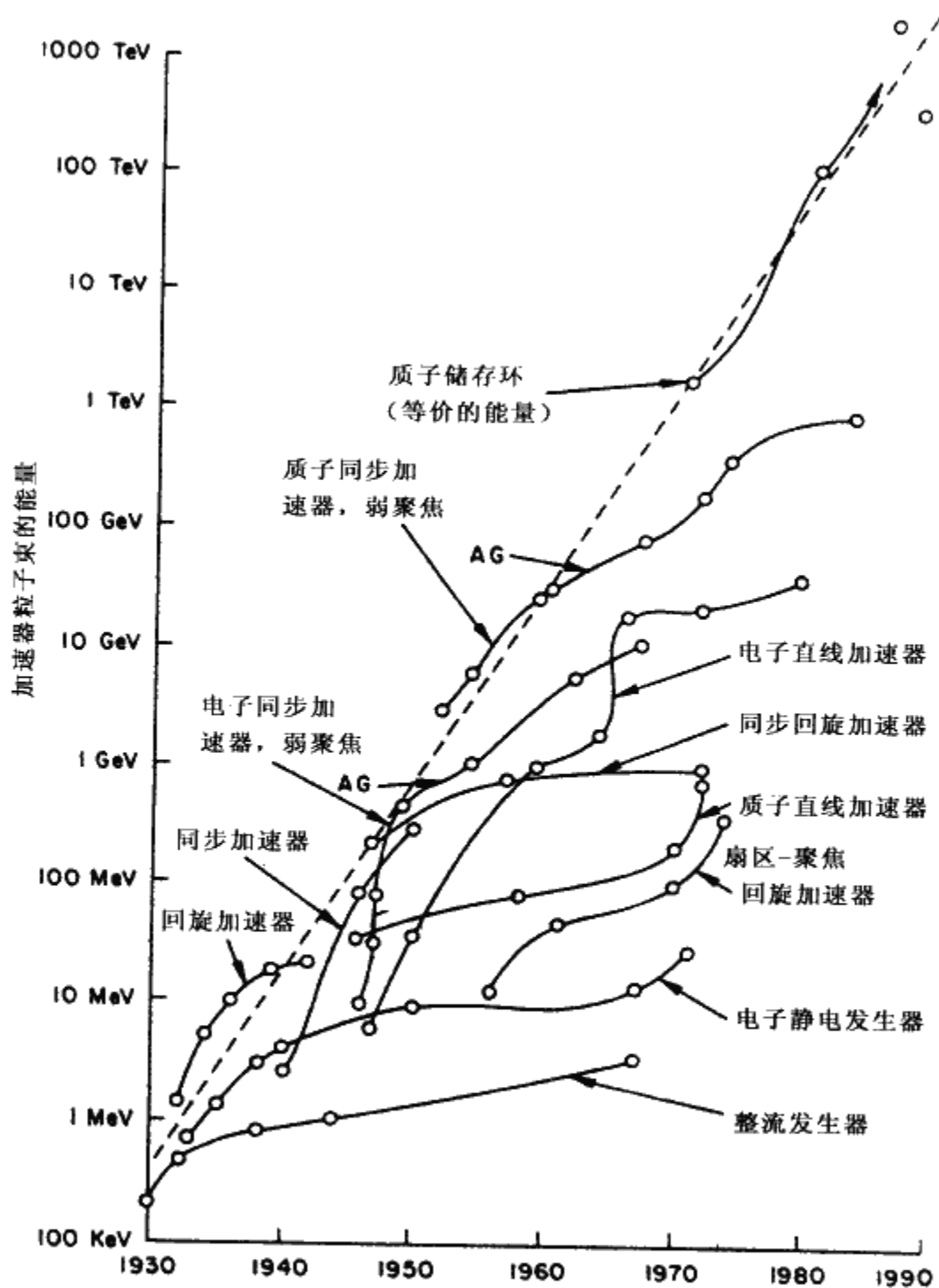


图 20.2 加速器粒子束能量随时间的增长 (1930 ~ 1984)

资料来源: Physics Through the 1990s: Elementary-Particle Physics.

作为战争努力的结果，在战后的早期有两个最重要的加速器研究设施出现了。布鲁克哈芬国家实验室（BNL）主要为美国北部各大学服务，装备有几种加速器，其中功率最大的是质子同步加速器。这台 3 GeV 的质子同步加速器是以 1945 年埃德文·麦克米伦的位相稳定概念为理论基础设计的。这概念为前苏联的弗拉基米尔·维克斯勒独立提出。另一个加速器中心在西海岸的加利福尼亚辐射实验室大学，它后来称为劳伦斯辐射实验室（LRL）。这里建成了一座功率甚至更大的同步加速器，900 万美元的高能质子稳相同步加速器，1954 年把质子加速到 6.2 GeV 的能量。质子同步加速器与高能质子稳相同步加速器主宰着基于加速器的高能物理学的早期阶段，导致了许多重要发现，如 1953 年奇异粒子对的产生和 1955 年的反质子。常规同步加速器比这些机器会更昂贵，但一种新兴的加速器，变梯度机器证明是一个有价值的新一代设备。1960 年，布鲁克哈芬 AGS（变梯度高能稳相同步加速器）利用所谓的强聚焦原理成为下一代高度成功的美国加速器。它可以跟 CERN（欧洲核子研究中心）独立设计的质子同步加速器（Ps）相匹敌，那是一台花掉了 3 000 万美元于 1959 年建成、可加速质子到 28 GeV 的机器。一台功率甚至更大的质子同步加速器在前苏联的塞普克霍夫中心建成。1971 年在它启动时有 76 GeV 的能量。它曾是一段不长的时期内世界上最大的加速器。

1957 年斯坦福的物理学家向 AEC、DOD 与 NSF 提议建设一个新的直线加速器，以进一步发展运作中的那类加速器。所提议的加速器不仅是已有项目的一种延续；它是跨向新程大科学的一个步骤。它将有 3.2 千米长，在当时是历史上最大的科学仪器，估计经费为 7 800 万美元。如果不是人造卫星的震撼，这项提议是不会有结果的。从它对于高能物理学的价值，才能证明它的正当性。艾森豪威尔总统想要展示美国的科学力量，在 1959 年题为《科学：自由的侍女》的谈话中，决定支持这个项目，要求国



会拨款 1 亿美元去实现它。通往国会的路并不平坦。对于许多政治家与科学家来说，这项目太昂贵了，不能单凭假设中的优点就合法了。一名议员质问：“从这机器中所获得的知识的应用前景如何？它将怎样提升我们人民的生活水平？”（Wang 1995, 354）回答当然是：SLAC——斯坦福直线加速器中心——不能提升生活水准。然而，国会通过了提案。1961 年投资 1.14 亿美元，并于第二年斯坦福与 AEC 签了约。在沃夫冈·帕诺夫斯基的指导下，SLAC 于 1966 年运行。即使加速器中心没有提高美国人的生活水平，从科学的观点，它证明是特别成功的。正如我们在下两章将会看到的，SLAC 对于 70 年代的新的 高能物理学是至关重要的。

建设甚至功率比高能质子稳相同步加速器和布鲁克哈芬 AGS 还大的美国加速器的计划，始于 60 年代早期。像大多数其他加速器一样，它是由 AEC 赞助的，这机构在 1964 年花在高能物理学上的经费有 1.35 亿美元。由于新机器的开支不可预测，所以，只能建设一台；这就导致贝克莱与布鲁克哈芬之间的多次争吵。关于美国未来的加速器中心设在何处的问题，经多次讨论，结果是：伊利诺伊州的巴塔维亚胜出贝克莱与布鲁克哈芬。1967 年，约翰逊总统为国家加速器实验室，或费米实验室，签署了议案，拨款 2.5 亿美元建设 200 GeV 的加速器。在费米实验室第一位主任罗伯特·威尔逊的领导下，这个巨大的项目于 1972 年完成。在数月内，威尔逊迫使加速器产生 400 GeV 的质子束。在当时，这是实验室所能产生的最高能量。但是，这不是终结。储存粒子束于固定轨道中、再令其碰撞的方法，首先于 1959 年用电子-电子束实现（斯坦福），1963 年则用电子-正子实现（巴黎外的欧塞）。后来，具有巨大科学价值的、更高能的电子-正子对撞机 1972 年在 SLAC 建成（称为 SPEAR），和 1989 年在 CERN 建成（称为 LEP），字母缩写词 LEP 指巨大的电子-正子对撞机。它有 27 千米长的环形轨道，的确是一个大机器。质子-反质子对撞机

是平行于电子-正子对撞机发展起来的。它产生了 1976 年的 CERN 的 SPS（超质子同步加速器）对撞机，利用它可得到 500 GeV 的能量。美国的回答是费米实验室的特瓦对撞机，它于 1985 年运行，利用超导磁铁驱动质子围绕一个 6.3 千米的环行轨道运动，机器的名称是指其最大的能量 $1 \text{ TeV} = 1\,000 \text{ GeV}$ 。1987 年，日本参加到竞赛中来，其目标是更高能量的特里斯坦对撞机，一个能量达到 30 GeV 的电子-正子对撞机，建设在东京附近的国家高能物理学实验室（KEK）中。表 20.1 总结了加速器在 1946 ~ 1985 年的发展概貌。

表 20.1 高能物理学中大科学的崛起

名称或类型	地址	能量 (GeV)	运行年份
回旋同步加速器	贝克莱	0.35	1946
质子同步加速器	布鲁克哈芬国家实验室	3	1952
质子稳相同步加速器	贝克莱	6.2	1954
质子同步加速器	杜布拉（前苏联）	10	1957
电子-正子对撞机	欧洲核子研究中心	28	1959
变梯度高能稳相同步加速器	布鲁克哈芬国家实验室	33	1960
质子同步加速器	费米国家实验室	76	1971
质子同步加速器	塞普克霍夫（前苏联）	400	1972
超导同步对撞机	欧洲核子研究中心	400	1976
特瓦对撞机	费米国家实验室	1 000	1985

注：选择 1946 ~ 1985 年的质子加速器，因为加速器的原理不同，其能量不可直接比较。

许多物理学家觉得，经过推敲后仍然觉得，在一个归根结底



是国际性的领域中，最合理的选择是建设一个真正的国际加速器设备。为什么不跳过可笑而耗资的竞赛而一道工作呢？1958年，一个关于“为了世界和平的加速器”的思想，首先在美国、前苏联与欧洲的物理学家中进行讨论。这思想——建造一个国际的1 TeV 加速器，造价10亿美元——不仅会导致重大的科学结果，而且，更重要的，会导致一种和平的氛围。按照罗伯特·威尔逊——支持世界性加速器的大物理学家的说法，“这种国际实验室的重大力量将是发展物理科学中的共同文化……粒子、加速器和社会，可再次相互作用——这一次会提供一种国际的和谐力量。”（Kolb and Hoddeson 1993, 106）世界实验室被讨论了几年。在20世纪70年代，和平共同发展思想进一步推出造一台10 TeV 机器。但是，浪漫的思想绝未超越讨论的水平，尽管关于国际主义有种种美好的修饰词，但它是不现实的。

意识到在开创高能物理学的事业中，欧洲正处在接替美国的路途中，1983年，美国物理学家提出建造一个以超导超对撞机（SSC）为基础的最终加速器设施。主张SSC的高能物理学家的论据有其民族情感。谢尔登·格拉肖和利昂·列德曼，两位美国领头粒子物理学家，作如下辩护：“美国的成就不应该越来越多地退回到过去的完美，而应该面向着未来的发展，而欧洲人却在追逐着现时的暗示……我们关切的是：如果我们放弃SSC提供给我们的机会，那么，损失将不只是我们的科学，而是更广泛的国家的骄傲与技术的自信心。”（March 1985, 34）SSC的名字不是夸张的：质子的碰撞能量约为40 TeV（或40 000 GeV），以及一个周长83千米的地下环行轨道，这真是一个超级机器；拟议中的超导磁铁系统需41 500吨铁和200万升液氮。特别是1990年将耗资100亿美元，它将是一个从未有过的最大与最昂贵的机器。里根总统批准了巨人项目，1988年宣布地址选在得克萨斯州的小镇瓦克萨哈奇。下一届总统德州人乔治·布什喜欢这个项目，他

以一种罕见的诗人情调把它比作“罗浮宫、金字塔、尼亚加拉瀑布，全都汇合到一起”（Kevles 1997, 292）。

建造 SSC 有许多科学理由，但是，对于如此规模的投资，单凭科学理由是不够的。SSC 的支持者提出的一些别的理由有误导性提示：超导磁铁方面的工作有助于发展医学技术，那可能在抗癌斗争中证明是有用的。如早期大加速器项目情形中一样，反对 SSC 的不仅来自于政治家，还来自于物理学家和其他科学家。他们认为：高能物理学是投资过多了，这对于科学与技术都是极其得不偿失的，应该把更多的钱分配给科学的其他领域。在批评者当中有菲力普·安德逊，固体物理学家与后来的诺贝尔奖得主，他早在 1971 年就提出：“馅饼是有限的，‘赞成’高能物理学，势必‘反对’别的什么事物。所以，现在显而易见的是：如果我们要维持一种健康的科学，那么，我们必须谨慎地看待它的所有部分。”安德逊不仅表达了对于所宣扬的来自高能物理学的种种技术副产品的怀疑，而且，反对“智力证明了基本粒子物理学几乎是唯一的方向，沿着它可以找到‘真正基本的’或‘精髓的’真理”（Anderson 1971）。20 年后，对于 SSC 项目，安德逊强化了他的批评。自然，他的论点被 SSC 的支持者们所反对，这包括里昂·列德曼、斯蒂芬·温伯格和高能粒子物理学共同体的其他领导人。SSC 的工作继续了一段时间，但在 1992 年这项目遇到严重困难。1993 年夏，在它耗费了近 20 亿美元之后，最终被否定了。否定的理由有政治的，也有经济的。归根结底，100 亿美元的经费是支撑不住的，何必把它耗在满足一小群高能物理学家的好奇上呢！在不同的政治条件下，这项目本来是可思议地被接受的——即如果它可以跟国家的安全挂上钩。但是，它不被认为有任何特别的军事意义。而且，无论如何，时机也不对。到 1992 年，冷战结束了，前苏联不再存在了。

20 世纪 50 年代繁荣的新型大科学的一个效应是：物理学家



的作用的明显移位，从个体研究者变为集体大运作努力中的一个小齿轮。物理学家不再有他自己的研究而是参与到一个研究项目之中。这种移位使许多老派物理学家为之叹息。其中一人是佩斯·布里奇曼，诺贝尔奖得主与科学哲学家。他认为新型物理学有害于创造性思维与智力自由。20年以后，这一批评被更年轻一代的物理学家所重复与强化。布里奇曼把这种变迁，归结于战争期间创造出来的研究结构。当时，年轻的科学家“没有独立工作的经验，不知那些工作的实质”就参加到大研究项目之中，“结果就是，”布里奇曼写道，“新一代物理学家成长起来，他们从没有实践过任何程度的个人的具体创新，他们没有机会品味那种满足或尝试各种可能性，他们把大团队中的合作性工作视为平常事……年轻一代的性格跟老一代很不一样。”（Bridgman 1950, 299）大科学造就——事实上，要求——一种在20年代布里奇曼做他的重要工作闻所未闻的合作与团队精神。

在大规模的实验中，不仅没有个人的空间，而且，昂贵的机器似乎占据了更多空间，变得比使用它们的物理学家还重要。机器怪物是弗兰肯斯坦的物理学家们创造的吗？布鲁克哈芬质子同步加速器主任沙缪尔·哥德斯米特（像布里奇曼一样，是20年代开始其学术生涯的诺贝尔奖得主）无意中说出了物理学家与机器之间的变化了的关系。在1956年一个内部备忘录中，哥德斯米特强调：“在这种新的工作中，实验技能必须被个人的提升与鼓励密切的合作、忠诚的品格所补充。”他继续写道，“由于从事质子同步加速器工作是一种很大的特权，我觉得我们现在必须拒绝它被那些有损于合作精神的、性格内向的人所用，不管他是多么好的物理学家。……我保留这样的权利，即拒绝我认为不适合团队工作的人参加到高能实验中去。我必须提醒你们：归根结底，不是你们而是机器，创造着你们正以如此高的热情考察着的粒子与事件。”（Heibron 1992, 44）大科学的危险——以及，或者本

质——从来没有被如此说中要害的了。

欧洲一项大的科学冒险

约在 1950 年，当核与粒子物理学开始被加速器主宰的时候，欧洲远远落在美国的后面。当时在法国物理学家皮尔·奥格和意大利物理学家埃多阿多·阿马尔迪等人的推动下，发生了一系列关于组织一个联合的欧洲研究项目的活动。经多次的艰难谈判，1952 年，决定建立 CERN（欧洲核子研究中心）暂时基金，1954 年建立了一个永久的组织。发起人大多数是法国人和意大利人，而欧洲的领导国家英国的反应是冷淡的。英国人在利物浦有他们自己的加速器，一台 400 MeV 的回旋同步加速器。他们对于浮夸的大陆计划没有信心，布莱克特把它称为“十分疯狂”。此外，英国对于欧洲合作没有政治兴趣，对欧洲统一的兴趣则更少。开始时，英国政府倾向于加入，只在 1954 年才完全加入。德国，确切说是德意志联邦共和国，提出了另一个政治问题。理由之一是：德国还不是 UNESCO（联合国科教文组织）的成员。CERN 基金广泛地被认为不只是一个科学的，而且，也是一个政治的组织，即欧洲合作的一个模型。对于海森伯与德国其他物理学家来说，那是一种战后恢复德国物理学名誉，忘却令人不快的纳粹德国的方式。1956 年，参加 CERN 的国家有：比利时、丹麦、西德、法国、希腊、意大利、荷兰、挪威、瑞典、瑞士、英国和南斯拉夫。最大的赞助国是法国与英国（各占 24%），接下来是德国和意大利（分别提供 18% 与 10%）。

CERN 的目标是“提供欧洲国家在纯科学与基础性核研究以及实质相关研究的合作”。合作的骨干计划是世界最大的加速器，在 1954 年，这意味着功率大于 6 GeV。应特别提及的是：“这组织不会关注军事要求的工作，它的实验与理论成果都将发表，或



以别的方式被人们所用。”事实上，美国高能物理学与欧洲高能物理学的主要差别之一，就是武装力量起着极不相同的作用。当然，欧洲军事机关被漠视的理由之一是不存在欧洲军事冲突。各国的武装力量没有大规模支持基础科学的传统，对于像 CERN 一样的多国组织不感兴趣。为了强调 CERN 的非军事与独立于政治的形象，决定不建核反应堆，并把实验室建立在中立国瑞士日内瓦附近。在项目的早期阶段，哥本哈根曾被考虑，但哥本哈根提案的主要支持者玻尔与克拉默斯未能让提案通过。

CERN 第一个主要项目质子同步加速，原先认为是布鲁克哈芬质子同步加速器的一种外推式版本。1954 年计划它的能量为 30 GeV，预算估计是 1 600 万美元——大约是 SPS 实际价格的一半。这机器如期建成。在 60 年代，实验室扩展了一些新的更大的加速器和探测系统。它一开始就是一个大的科学项目，并且，建设得越来越大。例如，1955 年，预算是 6 400 万瑞士法郎 (MSF)，或约 1 600 万美元，职员 144 人。10 年后，预算增到 2.75 亿 MSF，职员 3 788 人。此外，访问科学家人数从 1955 年 21 人增加到 1965 年的 315 人，和 1975 年的 1 289 人。管理人员与技术人员甚至比科学家增加得更迅速（表 20.2）

表 20.2 欧洲核子研究中心人事分布

类别	1955	1960	1965
科学家与工程师	83	170	349
技术员	102	527	604
辅助人员	35	241	871
管理人员	49	127	316
研究人员	18	71	73

注：资料来自于 Hermann et al. 1990, 396 ~ 398。

欧洲的联合努力在许多方面是成功的，但在开始时，在认真

挑战美国高能物理的领导地位上并不成功。美国加速器常常总是首先取得重大发现，随后很快就被欧洲确认。开始的 10 或 15 年实质上是 CERN 物理学家的学习阶段，他们中的大多数不大习惯于美国方式的大科学实验。在美国，大规模的加速器实验、创业精神以及实验家、理论家、管理人员和工业之间的合作可追溯到 30 年代；这传统在战争期间被军事项目极大地强化。当欧洲物理学家开始学习从事于组织物理学的新方法时，CERN 开始跟美国最好的实验室进行竞争。事实上，在美国实力雄厚地主宰了粒子物理学 30 年之后，在 70 年代末，势力平衡移位了，欧洲高能物理学开始领先（图 20.3）。这种移位可用纂编法文件化。例如，1970 年，所有高能实验物理学出版物中有 53% 源于美国实验室，只有 36% 源于欧洲，而在 1982 年，这个数字美国是 35%，欧洲

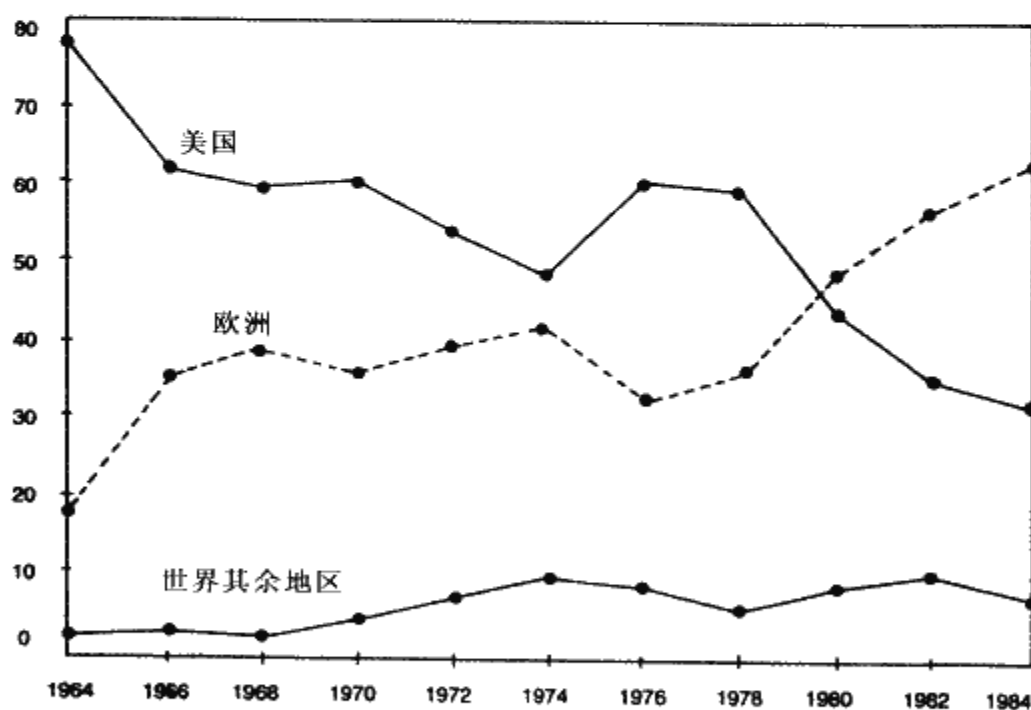


图 20.3 当年或前三年发表的高能物理学论文被引用的比例，按年份与地区。来源：Irvine et al. 1986.



56%。论文平均引用次数的相应数字是：1970 年，3.3（美国）与 2.9（欧洲）；1982 年，3.0（美国）与 3.9（欧洲）。70 年代，主要竞争对手是费米实验室与 CERN。1973 ~ 1976 年，费米实验室几乎占高能物理学的引文的 1/4；而在 1981 ~ 1984 年，则下滑至 9.3%。在最后的 5 年里，引文至少有 15% 是来自 CERN 的 SPS 规划的论文。在 1984 年，引文源于 CERN 对撞机的论文的平均引文数是 24，一个很大的数，指示具有很高的科学价值。

在 1997 年末，SSC 解散 4 年之后，美国与 CERN 达成协议，参与并使用未来的大强子对撞机（LHC）以及相关的粒子探测系统。美国同意赞助 5.31 亿美元。预定于 2005 年运作的 LHC 估计耗资 60 亿美元，将是世界上威力最大的加速器。加速器物理学历史的最新事态表明：高能物理学中心现在确定无疑地移位到了欧洲。它也表明：大的国际粒子物理学本身并未被 SSC 项目扼杀掉。虽然它是一个欧洲项目，LHC 不限于 CERN 的成员国，而是涉及 45 个不同国家的一种合作。就某种意义而言，它实现了一台“世界加速器”的旧梦。

第二十一章 | 发现各种粒子

主要的介子

基本粒子物理学尚未作为一个学科而存在，高能物理学也没有进入物理学的词汇之中。对于中子介子和其他基本粒子的研究被视为核物理学的一个部分，在这领域的活动，常常被安置在致力于“核研究”的新实验室和研究所内进行。由于1949年人们认识到汤川 π 介子跟宇宙射线的 μ 介子很不一样，考察更多新粒子的舞台就被建立起来，并且，一个成熟的子学科最终浮现出来。在他们1949年的单行本《原子核物理学与核的能源》中，乔治·伽莫夫和查尔斯·克里奇菲尔德提议：“在**固体物理学**与关于物质科学的尚未探明的下一个领域之间有一个方便的、界限甚至不太明锐的分界，这领域可暂时称为**基本粒子物理学**”。（强调标记是原有的）。从1950~1957年的前8届罗彻斯特年会，是处理“介子物理学”或“高能核物理学”的。但是，1958年在日内瓦召开的第9届年会就把“核”字去掉了，变成了一次讨论“高能物理学”的学术会议。在1958年国际理论与应用物理学联合会大会上，建立了高能物理学委员会。第一届委员会由美国的



罗伯特·马沙克与沃夫冈·帕诺夫斯克、欧洲的科尼里斯·巴克与鲁道夫·帕尔斯和前苏联的伊戈·塔姆与弗拉基米尔·维克斯勒组成。

50年代初，对于复杂、大功率、精致而昂贵设备的日益依赖，急速地把这一子学科转变成高能物理学的大科学。如二十章所述，这一子学科不久变为以政府的大力赞助为其特征，并且常常涉及数十名研究人员的团队活动。1950年，被预言与探测的基本粒子数大约是20个，宇宙辐射仍然是主要的粒子源。但几年之后，新一代加速器与探测器明显地改变了实验趋势。第一个人工发现的粒子是中性 π 介子，它是在反应堆中生成出来的，而不是在自然中发现的。中性汤川介子的存在，早在1938年，就被德国-英国物理学家尼克拉斯·克默提出。1947年，奥本海默提出假说中的粒子会迅速衰变为两个 γ 射线。1950年，这粒子首先在贝克莱同步加速器中被探测到，并认定 γ 射线转换成了电子对($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, 接着 $\gamma \rightarrow e^+e^-$)。不久之后，英国物理学家在宇宙射线中发现了该粒子。(从更哲学的观点看，一个人工生成的东西，不一定就是属于自然的东西。人们可这样辩护：在汤姆孙阴极射线中出现的电子是第一个人工产生的基本粒子。)

重介子的第一个证据是发现 π 子前被报道的。1944年，法国物理学家路易斯·列普林斯-里因奎特和迈克尔·伊赫里特在《报道》上发表一篇关于“在宇宙射线中可能存在质量为 $990m_0$ 粒子”，可能就是后来称为K-介子或k子的东西。可是，单个事件没有引起注意，法国人不承认其发现。战后，重介子首先被两个曼彻斯特的物理学家克里弗德·布特勒和乔治·罗彻斯特所报道。他们在1946年——大约在 π 子发现前一年——在他们的云室的宇宙辐射中发现一个V形轨迹，他们把它解释为一个重中性粒子衰变的产物，另一个来自于一个荷电粒子的V形轨迹是1947年被探测到的。但是，经过多次观察，直到1950年才确认这些

发现。这是由加州理工学院的卡尔·安德逊做出的，他得到了大量的 V 形轨迹。到 1952 年，V 粒子被确认，并认为它有 4 种。印第安纳大学的罗伯特·汤姆孙曾证明中子性粒子衰变为 $p\pi^-$ 或 $\pi^-\pi^+$ ，分别称为 Λ^0 与 Θ^0 （或 V_1^0 与 V_2^0 ）。发现了更多的衰变，其中有被怀疑属于迄今不知道的粒子。为了比较许多观察、确定通过衰变比较而得到的粒子的数目，以及术语标准化，在美国与欧洲召开了许多学术会议。1953 年，在法国一次会议上，国际宇宙辐射大会提议把奇异粒子分为两类：质量比核子小的 K 介子或重介子，以及质量大于核子但小于氘子的超子。L 介子或轻子包括 π 子和 μ 子。表 21.1 总结了 1957 年所知道的新粒子。当时，关于粒子的数目以及粒子的分类处于不确定状态之中，有些粒子同时有几个名字和符号。

表 21.1 1957 年前后已知的奇异粒子

类别	符号	质量 (m_e)	寿命 (秒)	奇异数
K 介子	K^+	966.5	1.2×10^{-8}	+1
	K^-	966.5	1.2×10^{-8}	-1
	K_1^0	965	$\approx 10^{-10}$	(+1)
	K_2^0	965	$\approx 10^{-7}$	(+1)
超子	Λ^0 (V_1^0)	2182	$3^{-10} \sim 10^{-10}$	-1
	Σ^+ (V_1^+)	2327	0.7×10^{-10}	-1
	Σ^- (V_1^-)	2343	1.5×10^{-10}	-1
	Σ^0	2325	$< 10^{-10}$	-1
	Ξ^-	2585	$\approx 2 \times 10^{-10}$	-2

虽然，大多数新的“奇异粒子”，是在宇宙辐射中捕获被发现的；但从 1953 年起大加速器越来越主宰这个领域；原先开拓性发现是由法国和英国物理学家作出的，但从那时起，这领域变



成由美国主宰了。1953 年，布鲁克哈芬国家实验室的 3 GeV 质子同步加速器开始生产 π 子束。1954 年，贝克莱辐射实验室的高能质子稳相同步加速器生产的粒子能量提到 6 GeV。加速器开辟了年轻的高能物理学新纪元。

为探测粒子事件而采用的各种新方法，跟加速器一样重要。在高能物理学的第一阶段，检验用的云室是通用的探测器。50 年代，它发展成许多适合于加速器实验室的新版本（高压与扩散型云室）。在同一时期，新型感光乳胶被广泛使用。核乳胶方法是 30 年代，特别地被维也纳物理学家马里塔·布劳发展起来的。但直到战后，这方法才在粒子物理学中具有决定性的的重要性。它乃是英国宇宙射线物理学家与伊尔弗德有限公司合作的结果。

传统的廉价方法，如云室与乳胶，被气泡室技术所补充，最后被其取代。气泡室技术是密立根大学的多纳德·格拉瑟于 1952 年发明的。格拉瑟的发明不久就发展成为多功能的仪器，特别被路易斯·阿尔瓦瑞兹及其贝克莱的团队所发展。以液氦为工作液的气泡室，证明理想地适合于在加速器中使用。从 20 世纪 50 年代末起，它就被广泛地使用了。它们不同于早期的探测系统，不仅在技术上，而且在大小、价格和复杂的运作上，它是一般小实验室负担不起、也使用有限的探测室——简言之，一个“非平民的”探测器。1959 年，72 英寸阿尔瓦瑞兹氦泡室价值 200 万美元，要求 100 万美元的计算机来分析其数据。早在 1957 年，第一个可自然跟踪并测量径迹的阅读机被制造出来。它被一位贝克莱工程师杰克·弗朗克所完善，合适的别名叫“弗朗克斯坦”。泡室图像测量发展成了一个小工业。1967 年，估计一年测量了 200 万个泡室事件。在 1964 年的实验中导致 Ω^- 超子的发现，约 10 万帧图像被拍摄，并得到部分的分析。

在第一批重粒子被发现后不久，物理学家想弄清楚如何从理论上理解它们。开始时，这意味着把它们分类。关于新粒子的产

生率与衰变之间的关系，讨论很多。分析显示它们是强相互作用，但具有并不跟强衰变相一致的长寿命。由于这些怪行为，它们常常称为“奇异粒子”。1951年，阿布拉罕·帕斯以及一群日本物理学家独立地提出相关产生的思想。这意指 V 粒子只能成对地产生。帕斯引入了一种量子数，类似于宇称，以说明被观测的衰变和未被观察的衰变。帕斯量子数是相乘的，具有选择定则的功能，跟早期量子理论中为了使光谱有意义而引入量子数没有什么不同。它的目的是起一种序化原理的作用，把一群或一族新粒子集合在一起。在其1951年的论文中，帕斯提到：“此时寻找序化原理最终可能要被比作化学家刚刚掌握十来个奇怪元素的情况下，企图建立起周期表来。”（Pais 1986, 519）粒子分类被描述成类似于门捷列夫的化学系统，可能是第一次，但肯定不是最后一次。然而，尽管类比的通俗性，它基本上是有语病的。粒子物理学家不仅从事于序化粒子的游戏；他们也要把它们理解为少数真正的基本粒子，如夸克的各种形态。他们的分类方案被理论观念所指引，并且用数学语言表述。在这方面，他们的工作基本不同于门捷列夫的工作。这位俄罗斯化学家经验地设计出他著名的周期表，作为已知物理化学性质的元素的一种理性分类。跟那时的其他化学家不一样，门捷列夫警告别把周期表想象成元素内部某种亚原子和谐性的反映。

强相互作用粒子的一个改进的说明方案，不久被芝加哥大学的26岁的穆瑞·盖尔曼同时也被日本的西岛与中野提出。盖尔曼引入一个附加的量子数，他称之为“奇异数”（ S ）——这名字是1953年秋提出的。 π 子、 μ 子和核子的奇异数被指派为零，而新的奇异粒子则不为零。例如，指派 K^+ 的 $S = +1$ ， Λ 的 $S = -1$ 。在所有强相互作用中，奇异数保持不变，从而这个概念关于反应发生或不发生起着一种向导作用。如 $\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$ 的反应是不允许的，因为它破坏了奇异数守恒（ S 由0变为-2）。盖尔曼-



西岛理论的各种预言均被实验证实，并且，到 1960 年。奇异数的概念，虽未被理论系统化，却已牢固地确立，成为基本粒子丛林中一个最有用的向导。这理论包含一个有争议的、关于中性 K 介子的分类问题。按照帕斯与盖尔曼理论，K 介子应理解为 K^0 与其反粒子 $\bar{K}^0$ 的混合。它是跟 K^0 不同的，具有相反的奇异数。 K^0 与 $\bar{K}^0$ 通过弱相互作用相联系。衰变粒子解释为具有不同衰变的 K^0 与 $\bar{K}^0$ 的“混合”或叠加。短命的 K_1^0 已知衰变为两个 π 子；长命的 K_2^0 推测衰变为 3 个粒子。当 1956 年，在布鲁克哈芬质子同步加速器上首次观察到 K_2^0 时，证实了这一推测。

介子超子和共振粒子不是 20 世纪 50 年代仅有的新粒子。狄拉克 1933 年预言的反质子长期就被期待存在，并且，甚至被报道过几次。例如，前苏联物理学家 1946 年宣称在宇宙辐射中探测到该粒子，但在 1955 年以前，这类宣称都未被承认。为了在质子物质碰撞中产生反质子，质子的能量至少必须 5.6 GeV。利用 1 万吨重、几乎耗资 1 000 万美元的质子稳相同步加速器，可达到的最大能量是 6.2 GeV，大大地超过了能量阈。虽然质子稳相同步加速器是一个理想的反质子机器，但它的设计不是刻意用于生成反质子的。只在 1955 年，它才用来生成该粒子。反质子的探测，1955 年首先由贝克莱的物理学家欧文·钱伯莱因、埃米里欧·塞格瑞、克拉德·维冈德和托马斯·乌普斯朗迪斯实现的。他们的闪烁器与切伦科夫计算器显示 60 个反质子候选者，但该粒子的最终跟一个正常质子湮没，未立即证实。那是 1956 年，阿马尔迪领导的一群意大利物理学家跟伯克利团队合作，报道了一个反质子在一个乳胶堆中被捕获。下一步，利用来自质子稳相同步加速器的反质子产生反中子，被贝克莱的另一个团队成功捕获。这些发现，没有一个是意料之外的。

科学的进步不仅仅依赖于质子稳相同步加速器实验的长足进展，实验的成功还有赖于 4 极磁铁系统的利用，该系统首先是由

布鲁克哈芬物理学家奥瑞斯特·皮斯奥尼提出的。他觉得贝克莱物理学家窃取了他的思想。1972年，在塞格瑞与钱伯莱因为他们的发现被授予诺贝尔奖14年之后，皮斯奥尼采取了相当极端的步骤，向他们提出他的控告诉讼。除了报界，谁也不怂恿这类不寻常之举。皮斯奥尼的诉讼不是唯一的离奇后事。1979年，J·C·库柏控告塞格瑞与钱伯莱因，说他们1955年故意压抑了他的关于展示快子或超光子证据的报道。他戏剧性类比为“塞格瑞实验之对于物理学共同体，水门录音之对于被废黜的尼克松总统”（Franklin 1986, 239）。水门对尼克松是不幸的，但4极磁铁系统对物理学是幸运的。控告缺乏证据，很少物理学家把它当真。

弱相互作用

确认中微子存在的探测期比反质子长4年。跟反质子不一样，它在理论物理学中几乎没起一点作用。在费米的 β 衰变理论之后，中微子（或者，宁可说反中微子）变得高度重要了，并且，到1940年，它被核物理学家常规地使用着。物理学家相信中微子的存在，不管它们是否能被探测到。然则，一个粒子的存在究竟是什么意思呢？1952年，在《原子科学家公报》的一篇题为《中微子果真存在吗？》的文章中，理论物理学家悉尼·丹科夫从实证观点认为这是一个无意义的问题，他认为像“中微子”与“电子”之类的概念，只不过是组织实在的一些方便方法而已。由于中微子与物质的弱相互作用，人们广泛认为它永远不会被探测出来。但是，1951年，洛斯阿拉莫斯的弗雷德里克·莱尼斯和克莱德·科万意识到：核爆炸的强 β 衰变可能提供足够的（反）中微子，可通过其跟质子的相互作用来进行探测。莱尼斯和科万认真想过利用一颗原子弹来做实验，但最后决定使用较为和平的核反应堆的发射性环境。克服许多困难之后，他们设计了



一个实验。实验中中微子在水中的效应会产生一个特别的 γ 射线吻合信号。为探测这信号，他们发展了一个复杂的探测系统，由浸没在一种有机液体内的 330 个光倍管组成。1956 年，利用萨瓦纳河反应堆作为中子源，他们发现了无疑是中微子-质子反应的信号。中微子的发现甚至比前一年反质子的发现更没有引起人们的惊讶。

在莱尼斯和科万的成功实验之后的几年里，其他实验表明：实验如果出现中微子的则不出现反中微子，因此，这两个粒子是不同的。这现象跟轻子数守恒相一致。1953 年，埃米尔·科诺斯基与霍莫兹·马莫德含蓄地提出过这一思想。电子与负 μ 子有 $L = +1$ ，像相关的中微子所具有的。但是，鉴于一个 μ 子衰变为一个中微子-反中微子对已为人所知。而衰变成一个电子与一个 γ 量子尚未被观察到；不过，按轻子数守恒这衰变却是允许的。形式上，这是可引入另一个守恒定律来说明的。那就是 μ 子数守恒。这等于提示：跟 $\pi\mu$ 衰变相关联的中微子，是跟中子衰变中的电子相关联的正常中微子不同的。如果情况是如此，那么， $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$ 是允许的，而 $\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$ 则被禁戒。1962 年，利昂·列德曼领导的哥伦比亚大学与布鲁克哈芬国家实验室之间的合作，用实验证实了这两个反应的区别，因而， μ 子-中微子确与电子-中微子相分离。这次实验的成功得到探测系统的保证，其巨型的闪烁云室重 10 吨。

在 20 世纪 50 年代，弱相互作用物理学中最为感人的发展，是弱相互作用中宇称不守恒的证明。宇称守恒，或左、右对称性原理，是 1927 年由尤金·维格纳引入到量子力学中来的，并立即获得一种规范地位。要注意：按其来龙去脉，宇称是一个特别的量子力学概念。当 1929 年厄曼·外尔为了零质量、 $1/2$ 自旋的粒子，提出一个二分量的狄拉克方程时，泡利反对这个方程，因为它不满足宇称守恒。一直到很久以后发现了宇称不守恒，外尔

的方程才恢复名誉。20 世纪 50 年代中期以前，物理学家对宇称守恒的教条没有怀疑过。回头来看，有几个显示守恒定律不成立的实验，却被另做解释。

随奇异粒子的发现而来的是：其中一种，称为 θ^+ ，看来衰变为两个 π 子 ($\pi^+\pi^0$)；另一种，称为 τ^+ ，看来衰变为三个 π 子 ($\pi^-\pi^+\pi^0$)。此外，两种粒子具有相同的质量和相同的寿命。所以看来，同种粒子恰有两种不同的衰变模式。可是，如里查德·达里兹与其他人于 1954 年所证明的， θ 的自旋与宇称与 τ 是不同的。因此，推测它们是不同的粒子。这谜团在 1955 ~ 1956 年间被广泛讨论着，并有各种解决方案提出。1956 年，李政道与杨振宁，两个战后不久来到芝加哥大学的年轻的中国物理学家，作为一个现实的可能性提出宇称不守恒。他们惊讶地发现宇称守恒并没有得到早期实验的很好支持：“我们明明白白地看到：不仅在 β 衰变中，当时不存在宇称守恒的单一证据；而且，我们一直是蒙在鼓里。” (Franklin 1986, 14) 在“停止计算并开始思考”之后，他们在 1956 年早些时候提出在弱相互作用中宇称不守恒，虽然他们告诫：“这一论据不是……当真的，因为我们现在缺乏关于奇异粒子的知识。”李政道与杨振宁的思路引导他们提出两种实验；一个用 β 衰变；另一个用 $\pi\mu e$ 衰变。这些实验在 1957 年被三个物理学家团队实施：哥伦比亚大学的吴健雄考察 β 衰变；介子衰变则被也是哥伦比亚大学的里查德·嘎文、利昂·列德曼与马瑟尔·温里奇，以及芝加哥大学的杰罗姆·弗里德曼与瓦伦丁·特勒格迪各用不同方法考察。结果证明，李政道与杨振宁是正确的：宇称在弱相互作用中不守恒。尽管宇称不守恒与以往的观念尖锐冲突，宇称守恒定律的失效还是迅速被物理学共同体接受。泡利，这位对称性原理的信仰者，迟至 1957 年初，在致维克托·维斯科普夫的信中他还说：“我不相信上帝是个左撇子。”他也不例外，在另一封致维斯科普夫的信中，他描述了他的反



应：“现在，在第一次震撼过后，我开始振作起来。是的，那是十分戏剧性的。……我被上帝喜欢左撇子的事实所震惊，我尤为震惊的事实是：当上帝强烈表达自己时，他仍然看来是左、右对称的。”（Franklin 1986, 25）

宇称不守恒的发现，有助于基本物理学智力氛围的活跃，导致一种趋势：对于其他守恒定律的绝对有效性也提出质疑。如菲力普·莫里逊在 1958 年所表达的，“不可避免地现在要让一切基本的对称性面对合理的质疑，并受到实验的检验。”（Kragh 1997, 204）当人们用新眼光打量这时期所讨论的宇宙模型时，甚至能量与电荷守恒都被质疑。李政道-杨振宁的说明表明：不仅宇称（ P ）在弱相互作用中不守恒，而且，在电荷共轭情形中，即粒子与反粒子的对称性也如此。这种对称性可追溯到 1931 年狄拉克引入反粒子的第二年，那是被温德尔·弗里的一条定理表述的。1937 年，这定理被克拉默斯称述为一条一般不变性原理。尽管接受吴健雄与其他人的实验结果，朗道与别的一些人对宇称不守恒总有些耿耿于怀，因为它似乎跟空间各向同性相冲突。“在我看来，简单地拒绝宇称守恒会把理论物理学置于一个不快的境地之中，”朗道 1957 年写道。因此，他建议“相对两个操作的乘积（ CP ），我们仍具有不变性，我们称之为联合反演……它由空间反射同粒子与反粒子的交换所构成”（Franklin 1986, 79）。

如 1955 年帕斯与皮斯奥尼所证明的，盖尔曼与帕斯提出 K 子的粒子混合理论，预言一束长寿命的 K_2^0 粒子通过物质之后会“再生”短寿命的 K_1^0 粒子，它原来是跟 K_2^0 粒子相混合的。这现象于 1961 年被证实。几年之后，普林斯顿物理学家詹姆斯·克朗宁、吉姆·奇里斯登森与瓦尔·菲奇，跟法国人瑞尼·特里合作，着手对其进行详细的考察。与此同时，他们研究了 K_2^0 的两介子衰变，一个 CP 守恒禁戒的过程。在布鲁克哈芬新的变梯度同步加速器中实现的精细实验结果，发表于 1964 年。从几乎 3 万

个被分析的衰变中示出 45 个双 π 子衰变。如普林斯顿团队所指出的，这证明：在这种特殊的衰变中，甚至 CP 守恒也被破坏。这个重要的后来被授予诺贝尔奖的结果，只在普林斯物理学家的论文中被简单地提及。他们写道：“双 π 子衰变模式的存在意味着： K_s^0 介子不是 CP 的一个纯本征态。”就是这么一点，但足够了。

或许一切不变性原理中的最强有力者， CPT 定理，陈述了在 CP 与时间反演 (T) 的联合操作下一切过程是不变的。20 世纪 50 年代这定理被表述成不同的版本。一般认为创始者为泡利、格尔哈德·留德斯，或朱里安·施温格，但约翰·贝尔与布鲁诺·朱米诺也应该位列其中。由于不变性原理是牢固地建立在相对论与量子力学最基本的概念之上的， CPT 定理在物理学中具有一种很高的、几乎神圣的地位。由于 K_s^0 衰变中证明了 CP 破坏，人们意识到 CPT 定理绝对有效性不再成立，但也不能宣称时间反演必定失效。面对这种任一抉择均不完全成立的两难局面，大多数物理学家接受了普林斯顿证明 CP 破坏的结果。有些人提出另外一些说明，但它们均未获广泛接受。看来对于大多数物理学家来说，两害选其轻，接受时间反演对称性中在 K_s^0 衰变中被破坏合理一些。虽然，60 年代中期以来，人们一直寻找 T -反演的直接证据，却一直没有发现肯定的确证。

1957 年宇称破坏以及 1964 年 CP 破坏的实验的意义，不仅仅是认识层面的突破。这两个事件在称之为弱相互作用物理学的子学科的形成中也是十分重要的。这一领域可追溯到 1933 ~ 1934 年的费米理论，但约从 1957 年起，它只获得一种社会学意义。资料编纂表明；这两个事件对于弱相互作用理论的崛起的意义。作为物理学总出版量中一个百分比，弱相互作用出版物在 1958 年从 1% 上升到 3%，然后，在两年内又回落到它的“正常”量 1%。在 50 ~ 70 年代，弱相互作用中理论为主的论文相对于实验



为主的论文的百分比从 0.8 上升到 5.8。(Vlachy 1982, 1066) 在 1958 年与 1965 年两个时段比例的突增，反映了两个对称性破缺的突破性发现的影响。

夸克

按照物理学的传说，据称费米在有人问关于基本粒子的名字问题时，回答说：“年轻人，如果我能够记住这些粒子的名字，我早就是一名植物学家了。”那是 1954 年的事，十年后，一篇评论文章注意到“仅仅 5 年前，列于清单上的亚原子还只 30 个……自那以后，又发现了六七十个亚原子物体了”。(Pickering 1984a, 50) 事实上，在这些年里，由于各种加速器与探测系统的发明，强衰变 π 子与重子的数目爆炸性猛增。随之而来的是一种理解它们的需求，或者至少，按某种理论构架将它们加以分类。就归类法而言，组编基本粒子的思想可追溯到 40 年代晚期，那是以同位素程式为基础的。1949 年，费米与杨将 π 子想象为一个核子与一个反核子的组合，而在 1956 年日本物理学家阪田昌一提出新的理论，按此理论，两个核子加一个 Λ 粒子——有时称作“阪田子”——是重子与超子的建筑砖块。阪田和名古屋大学的其他物理学家对于基本粒子的组合的兴趣，受到马克思的辩证唯物主义指导。虽然阪田模型看来很有希望，对于理解介子态是有用的，可是，到了 60 年代初，在日本之外它没有引起什么反应。

早期分类方案中最成功者（与阪田一样）是以 $SU(3)$ 对称群为基础的，它本来是强相互作用的规范理论的一部分。 $SU(3)$ 群的提议是 1961 年独立地被当时在加州理工学院的盖尔曼和当时作为一名军事随员在伦敦服役的以色列理论家尤瓦·列耶曼提出的。这一理论后来称为“八重态”，这名字是盖尔曼引入的。按照该方法或分类系统，粒子“被分解”或“被表示”为以确定

自旋、宇称数以及包含具有不同同位旋与奇异数的粒子为特征的多重态。例如， $1/2$ 自旋与正宇称的粒子形成一个由 p , n , Λ , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , Ξ^- 与 Ξ^0 组成的八重态。其中每个粒子被其同位旋和奇异数所表征。八重态是盖尔曼-列耶曼理论的基本实体，它也包括双重态以及对于介子的九重态。当八重态被提出的时候，在图案中有几个“空穴”以未知粒子的形式存在，并且，有些新近被探测到的粒子的正当位置存在不确定性。在由 π 子与 K 子构成的八重态中，一个粒子是缺位的。当 1961 年秋发现 η 共振子时，证明它很好地符合这一方案，它给予八重态有价值的支持。1962 年，罗彻斯特会议上讨论了八重态理论，同年 CNER 会议也讨论了这一理论。在这两次会议上，自旋 $3/2$ 与正宇称的强子多重态是讨论的议题之一。这个多重态包含 9 个粒子，其中 Σ^* 与 Ξ^* 是第一次在 CNER 会议上宣布的。如果它有一个二重态的话，那么，它必定还包含一个——并且仍未知的——粒子。盖尔曼和列耶曼独立地认为第十个成员必定是奇异数为 -3 、质量为 1680 MeV 。此外，它会是一个具有相对长寿命正常粒子，而不是一个共振子。盖尔曼将这粒子命名为 Ω^- 超子，这个粒子留待让实验物理家去证实。（质量单位 MeV 是 MeV/c^2 的速写，接近 2 个电子质量）。

欧洲与美国的物理学家争相找到，或宁可说制造并发现了所预言的粒子。这种寻觅很快变成了欧洲的 CNER 与美国的布鲁克哈芬实验室之间的竞争。美国获得了竞争的胜利。1964 年，33 名布鲁克哈芬物理学家在尼可拉斯·萨米奥斯的领导下得以宣布一次完全成功的实验。在其暴露在 K 子中的氢气泡室中，他们发现一条他们推断是被 $K^- p \rightarrow \Omega^- K^+ K^0$ 产生的 Ω^- 衰变产物的径迹。这粒子不仅具有正确的奇异数 (-3) 和寿命 (0.7×10^{-10} 秒)，而且，他们发现其质量是 $1686 \pm 12 \text{ MeV}$ ，与预言值绝妙地吻合。这一确认当然是 $SU(3)$ 和八重态的伟大胜利。它的公正性已毋庸置疑。



疑了。由于方案的成功，物理学家自然想弄清楚为何它如此地有效。这问题甚至在 Ω^- 成功之前就被盖尔曼及其他人考虑过。实验的重要性，可以从另一个角度检证，像纯科学角度一样作为现代粒子物理学的标志。在布鲁克哈芬团队向行动迅速的《物理评论快报》递交论文前，他们召开了个报界会议，要求等到论文发表之后再公开其发现。不知怎的，出现错漏，《新科学人》抢在论文发表前公开了发现。布鲁克哈芬的一位物理学家回忆说：“那简直是一切大乱，它掠夺了我们的首发权。我们本会获得《纽约时报星期天》的首版的，那对我们很重要。究竟我们到哪里去获得我们的钱呢？——从国会。如果得到《纽约时报星期天》的首版的话，情况大不一样，因为大多数国会议员阅读该报的首版。一个因素，我们不能否认，所以，这对我们关系太大了。”（Gaston 1973, 86）

1964 年，盖尔曼提出用强子（强相互作用粒子）合成模型解释八重态，他受到詹姆斯·乔伊斯的小说《芬尼乌斯的觉醒》中的一段情节的启迪，称合成粒子为“夸克”。类似的提议被乔治·兹外希，一位 27 岁的俄罗斯出身的美国物理学家，与盖尔曼在 CNER 工作的学生，独立地提出，但用的是“么点”而不是“夸克”。物理学家采用了盖尔曼更具文学意味的名字。按照夸克的思想，所有强子都是由两个或三个夸克与它们的反夸克组合而成，这意味着：几百种强子与共振子被归结于三个基本实体的各种组合。它们是“ u （上）”夸克与“ d （下）”夸克，两者都具有零奇异数，但具有相反的同位旋；以及“ s （奇）”夸克，其 $S=1$ 。例如，质子的组成是 uud ，负 π 子是 $d\bar{u}$ 。夸克图像最引人注目的特点是假设中的物体具有分数电荷，即 u 夸克的电荷是 $+2/3$ ， d 夸克与 s 夸克是 $-1/3$ 。夸克不只是助记忆的符号吧？它们是以可被探测的动力学实体而存在的吗？这些问题立即被那些承认简单的夸克图像成功但怀疑夸克本体论地位的物理学家所回

答。盖尔曼，夸克的发明者，强调他的发明并不表明夸克的真实存在，“揣测夸克若是具有有限质量的物理粒子，它的行为会怎样？那是可笑的。”在其1964年的论文中，他写道：“在高速加速器中搜索电荷为 $-1/3$ 或 $-2/3$ 的稳定夸克与/或电荷为 $1/3$ 或 $+4/3$ 的稳定双夸克，会使我们确信真实夸克不存在。”（Pickring 1984a, 88）后来，盖尔曼宣称他用“真实的”一词是反对“数学的”，并不否认夸克的存在，而是避免坠入这个被永远禁闭的基本粒子的存在性意义的哲学讨论。

夸克模型在其早期年代，不是被普遍看好的。理由之一是，探测自由夸克的努力屡遭失败。另一个理由是，夸克模型广泛地被视为缺乏理论基础，跟当时别的通俗说法不一致。夸克在唯象的水平上运作得很好，但对许多物理学家来说，它们只是一个尚未理解的强子世界动力学的一些简单化表示。不太热心的反应并没有阻止实验家努力证伪盖尔曼，即证明，夸克存在而不是不存在。在1977年一份关于夸克搜索实验的综述中，列出了80个这样的搜索。在随1964年理论而来的许多搜索中，最有趣的是被威廉·菲尔邦克及其在斯坦福大学的合作者实施的。1977年在进行这项工作几年之后，斯坦福团队报道他们在类密立根油滴实验中，发现了分数电荷，即有三例铈球携带 $1/3$ 的电子电荷。这消息引起实验与理论上的非议，因为当时理论家相信，作为实体的夸克并不存在，它们被禁闭在它们所组成的强子内。这宣称也没有被别的实验所确认，所以，经多次讨论之后，它被粒子物理学共同体所拒绝。说到这一点就足够了。

夸克不是难以探测的仅有基本粒子。许多别的奇怪粒子曾被预言却从来没被发现，或因它们太难于发现，或因它们不存在。磁单极子就是一例。1931年，狄拉克证明：孤立的磁单极子是可能的，就是说，它是跟基本物理学定律一致的。30多年里，这种可能性被忽视，直在70年代，荷兰的格拉达斯·特霍福特和前



苏联的亚历山大·波利雅科夫证明：一定的规范场论预言有质量的磁单极子。在这之后，磁单极子遂变成一个有趣的对象。1975年，保尔·巴弗德·普赖斯及其合作者宣布他们在宇宙射线中发现了一个具有预定强度的磁单极子。这是在一次出版界的会议上宣布的，引起一场轰动。普赖斯谈到（或许，讽刺地）“放几颗磁单极子在你的船中，你就可驱动你的船漂洋过海，利用地磁场拖着它横过大洋”。但不止如此，按照美国物理研究所的说法，这发现也可导致这样一些有用的应用，诸如“抗病斗争，如抗癌的新医学疗法，或者，新的能源”。对于夸张陈述的回应，美国物理研究所的发言人说：“人们期待你得以说出一项发现有何用途，那么，他（发言人）会尽力把它做得最好。”（Kragh 1918, 160）事实是，磁单极子既没有导致磁能，也没有导致癌症被治愈。一年之内，公众舆论一致认为，这项宣称的发明是一个错误。

普赖斯宣称的失败，单极子的寻觅者并未止步，他们继续寻找这逃逸的粒子。1982年，又有惊人的宣称，这次是由斯坦福大学的布拉斯·卡布瑞拉做出的。他记录了超导环中磁通的一个变化，把它解释为一个单极子穿过该环。虽然，这事件找不到其他原由，也无法证明它是一个错误。卡布瑞拉和别的人都无法确认这事件。单一的事件不足以改变单极子的地位，把它从一个已知的迷失粒子变为一个真实的粒子。

粒子物理学的成长

从社会学与定量的观点来看，高能物理学的第一个 1/4 世纪，有两个特征：强劲地成长与强势的美国主宰地位——不是“美国化”，因为这么说就意味着美国接管了一个业已确立的领域，情况不是这样的；在某种程度上，高能物理学是美国的一项发明。（在本节中我们将跟习俗相一致，称高能物理学为 HEP。）

在1950~1970年，HEP的国际分布没有可靠的资料，但美国物理研究所的一份研究指出：60年代中期，高能物理理论学家的32.3%是美国或加拿大人，35%是非共产主义欧洲人，剩余的是前苏联及其东欧盟友国人，日本的人数可观，第三世界则可忽略。美国主宰是毋庸置疑的，考虑到战前局势以及战时与战后不久的变故，也没有什么可惊讶之事。不过，有两个重要因素应加以甄别：第一，美国投资HEP很多，但实际上不是比欧洲某些国家还多。例如，在1967~1968年，美国花了1.6亿美元在HEP上，这确是一笔大数。它是英国的4倍。但剔除人口和人均收入的差别，纯结果是：英国在HEP上的投入比美国多。第二，许多在美国工作的物理学家是欧洲或亚洲人，从而跟这个国家共享对物理学的贡献。所以，上述32.3%的北美欧洲人中只有20.4%为美国公民，另外的12%是在美国工作的非美国人。在战后第一个十年里（以及，今天仍如此，不过程度降低了），在物理学的许多领域中，美国有着磁铁般的吸引作用，助长了物理学的国际化——有人称之为美国化。所以，美国的主宰，在质和量两个方面都不是整体的。1981年，世界在HEP方面总论文的国家排名是：美国居榜首，几乎占30%；接下来是前苏联、德国、日本、英国、法国、意大利，均占4%或更多；在“第二档次”中，从1%~4%，是加拿大、波兰、西班牙和以色列（表21.2）。同年，另一款项目示出每百万人口粒子物理学家的论文数：以色列居第一，接下来是瑞士、德国、丹麦和美国。

这些数据可能有趣，不能把它们看得太当真。像物理学大多数分支一样，HEP是国际性的。真正要考虑的是不太注重实施研究的机构的所在国。在这方面，如我们在第二十章中所指出的，CNER和别的实验室从约1980年起就夺得了领头地位。这种移位意味着高能物理学家不同增长率。1962年，欧洲HEP共同体由685位科学家组成，美国的HEP共同体则有798名科学家。到



1975 年，就人力资源而言，欧洲超过了美国。该年，美国有 HEP 博士学位的物理学家增加到 1 732 人，而欧洲有 HEP 博士学位的物理学家则可夸口一下，1 806 人。

表 21.2 1982 年高能物理学出版物的地域分布

排名	国家或地区	出版物百分比
1	西欧	34
2	北美	31
3	前苏联	14
4	日本	6
5	东欧	5
6	印度	3
—	其他	7

注：该年在该领域中出版物的总数为 4 000。资料来源：Vlachy 1982。

撇开国际性，我们来看具体国家在文化沉积上形成的 HEP 工作的自然趋势。例如，在日本，战前粒子物理学与量子场论就具有强大的地位，这在很大程度上归功于仁科方雄与汤川的工作。在战争年代里，汤川、友永、阪田和其他人在日益困难的条件下继续其工作。美国的占领带来一项法令：“在日本，一切涉及原子能领域的基础与应用研究应被禁止。”（Konuma 1989, 536）尽管困难重重，理论 HEP 在日本以最注目的方式繁荣昌盛。1946 年汤川创办的国际性日本期刊《理论物理进展》，说明了这个成长。它变成了 HEP 的领导刊物（见图 21.1）。

图 21.1 给人的印象是 HEP 是在 1945 年以后的 20 年内形成“爆炸性”趋势。这不是一个没有根据的印象。1964 年以前没有可靠的数据，但在 1964 ~ 1968 年——在许多方面，这是 HEP 的蓬勃发展时期——在“核物理学与高能物理学”类的出版物从

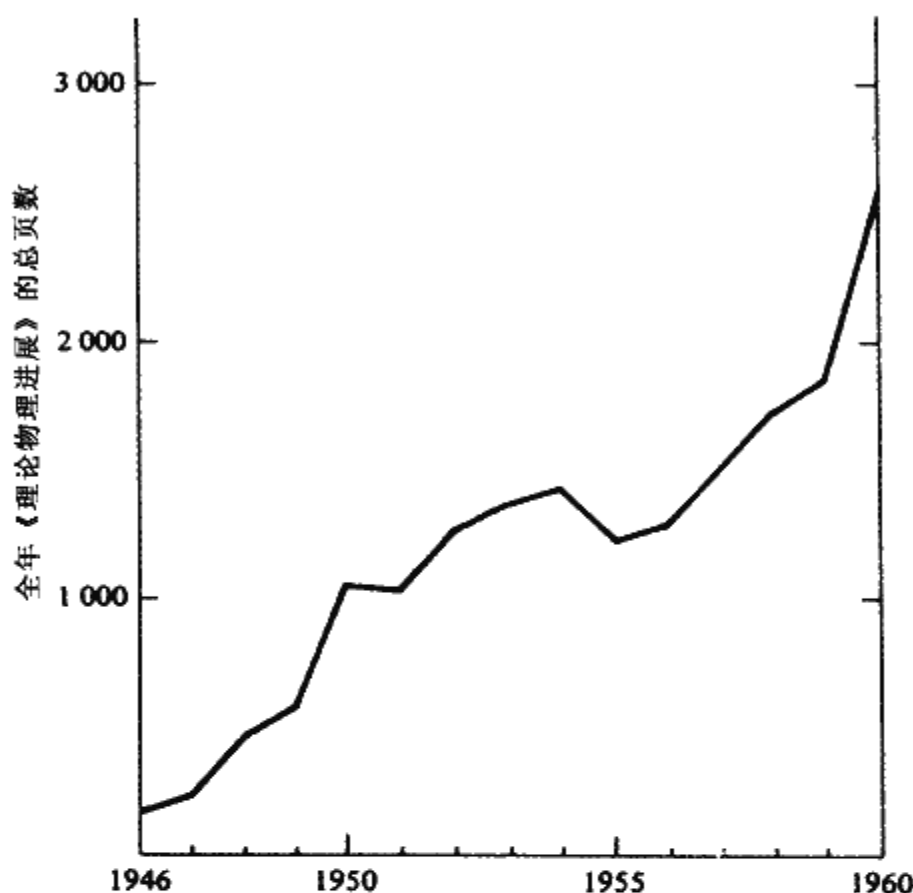


图 21.1 1946 ~ 1960 年日本期刊《理论物理进展》的扩容，用全年的总页数表示。来源：Konuma 1989.

5 486篇上升到 8 242 篇。乍看起来，这似乎是一个猛增，但实际上它甚至比不上物理学的平均增长：HEP 的论文在总物理学论文中的百分比从 19.1 下降到 16.3（表 21.3）。主要原因是，在这以前被认为是 HEP 的老大哥的核物理学变得不大众化了，而不是对 HEP 的兴趣有所降低。恰恰相反，在这 4 年里，HEP 经历了一个戏剧般的繁荣。论文从 1592 篇上升到 4776 篇，增长率是前所未有的。表 21.3 列出了 1964 ~ 1968 年间不同领域的增长。表 21.4 列出同一时期某些专业的增长。这是一个 HEP 与固体物理学日益



表 21.3 根据 1964 年与 1968 年的《科学文摘》，出版物的科学领域分布

学科领域	1964		1968		年增长 (百分比)
	数目	百分比	数目	百分比	
固体物理学	9 024	31.5	16 992	33.7	22
核物理学与 HEP	5 486	19.1	8 242	16.3	13
电学与磁学（包括 等离子体物理学）	3 781	13.2	4 572	9.1	5
分子与原子	2 156	7.5	4 327	8.6	24
流体	1 487	5.2	3 612	7.1	36
天文物理学	1 124	3.9	2 288	4.5	25
地球物理学	1 110	3.9	2 596	5.1	35
光学	798	2.8	1 407	2.8	19
生物物理学	206	0.7	83	0.16	-15
总计	28 656		50 477		19

注：未涵盖一切领域。来源：Anthony, East and Slater 1969, 723

占据主导地位，而前十年的时髦核物理学丧失其特权的时期。从 20 世纪 30 年代中期到 50 年代中期，核物理学是物理学绝对时髦的分支，而 HEP 只是尾随其后。1939 年，《物理评论》全部论文的 33% 是属“核物理学”类，10% 属“高能物理学”类。1947 年的比例分别是 51% 与 12%。但在随后的 10 年里，HEP 的比例急速上升，核物理学的比例相应下降。

表 21.4 1964 ~ 1968 年特定学科的增长

学科	数目		增长 (百分比)
	1964	1968	
高能物理学	1 529	4 776	53
固体的磁性质	910	2 563	46
固体的电性质	1 232	2 808	32
固体的光学性质	985	2 009	26
分子物理学	1 437	2 329	16
固体中的缺陷	858	1 229	11
等离子体物理学	962	1 373	11
核反应堆	1 043	1 301	6

来源: Anthony, East and Slater 1969, 724

简单地用爆炸之说来说明 HEP 战后的繁荣是不够的。我们可以先考察一下主要来自能源部与自然科学基金对于高能物理学的投资 (图 21.2)。在 1955 ~ 1965 年的 10 年里, 投资的增长从未间断, 峰值约在 1970 年, 该年对这领域的投资几乎接近 8 亿美元 (1984 年价值水准)。但从那时起, 对 HEP 的赞助逐渐但非陡然减少。对于 HEP 共同体来说, 仍然有段令人担心的时期 (也可参阅第二十六章)。1975 年, 美国 HEP 所接受的赞助仅相当于 5 年前的赞助的一半。在这段短暂的危机时期, 甚至硬通币基金也减少了。约从 1970 年起, 对于美国 HEP 兴趣的减少也反映在该领域获得博士学位的人数上。HEP 一直习惯于增长。1971 年, HEP 博士生人数达到顶峰, 约 280 名研究生获博士学位。然而, 1975 年急速下降到 130 人。在以后的 15 年里一直在这个水平上。



每年合1984年(兆美元)

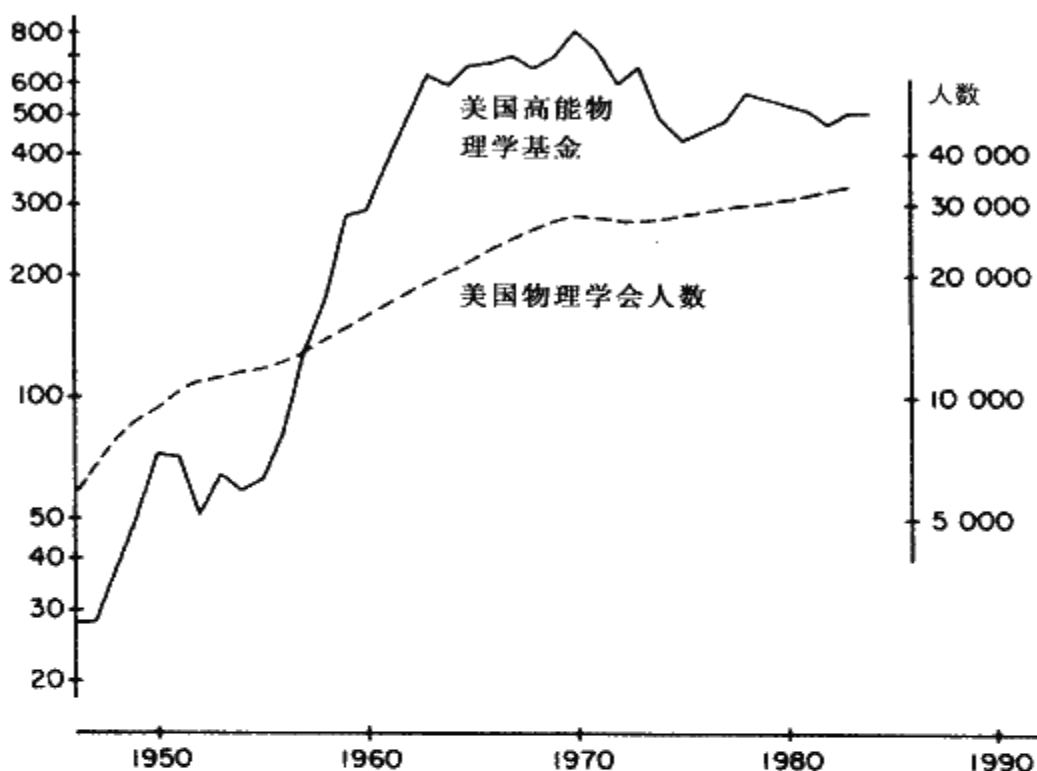


图 21.2 美国高能物理学每年的基金与美国物理学会人数, 来源:
Yang 1989

下波动。博士生人数从1963年的高峰占有物理学博士的19%降到最坏年份1975年以后的约12%。基金投入是一个问题, 博士研究生是另一个问题。通常认为是一门学科健康状态的客观标准的HEP出版物怎样呢? 大体上, 从1960年到1990年, HEP的出版物是稳步上升的。但这个增加在某种程度上是一个错觉, 因为从总的物理出版物中占的比例来看, 这个数字从1960年几乎占14%减少到1975年以后几年的6% (图21.3)。这些数字是对美国HEP而言的。在世界范围内, 在一切物理学论文中HEP的比例1981年约为4%, 美国低于世界的平均值, 有些国家, 如西

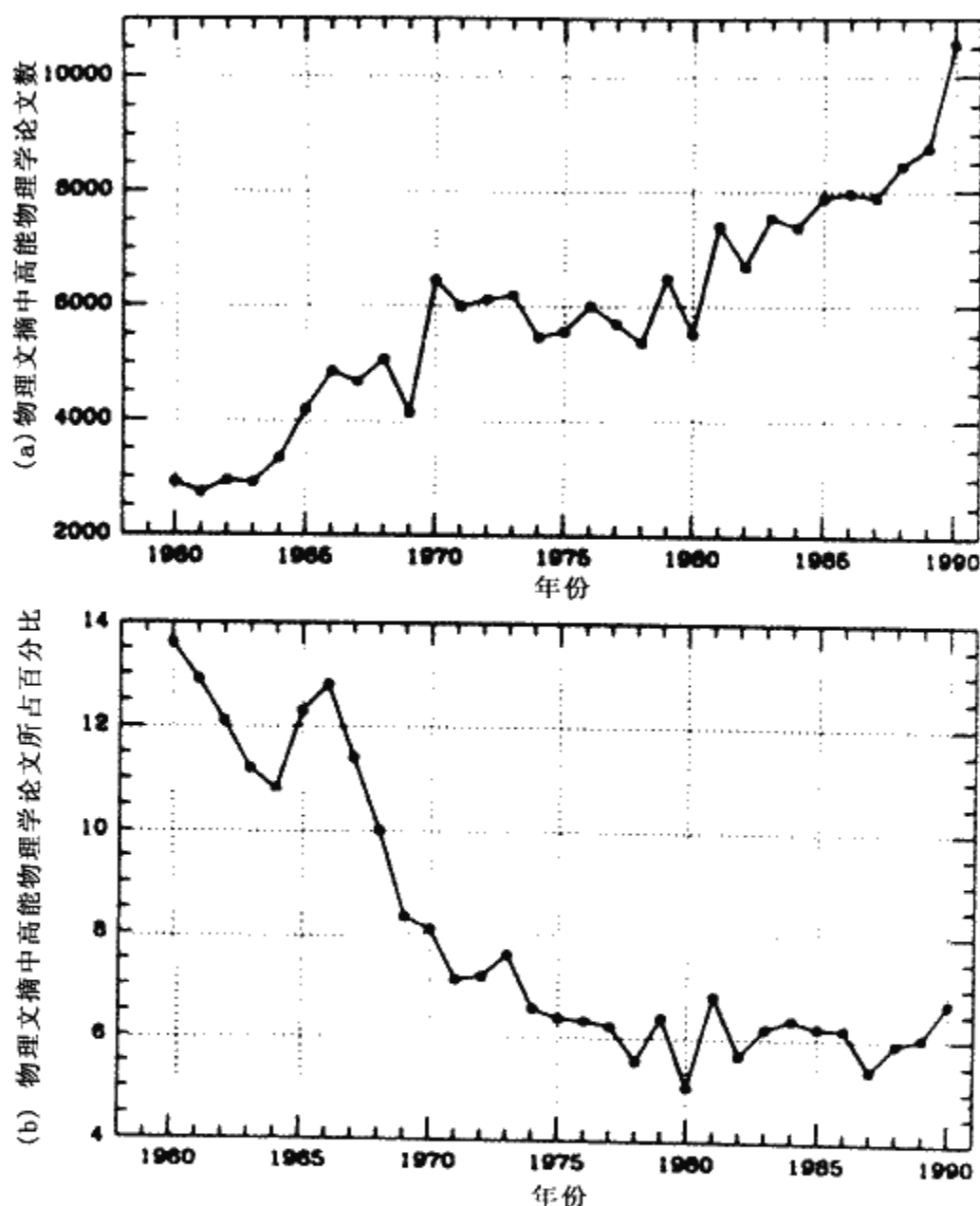


图 21.3 a 图示出每年高能物理学在《物理文摘》中录入基本粒子、量子场论、宇宙射线、粒子加速器与探测器和相关仪器的论文数目；b 图按占总论文的百分比示出同样的数据。来源：AJP (1991) 59: 779 ~807。

班牙、意大利、以色列和巴基斯坦，则高于平均值。当然，如通



常那样，在科学中存在一个第三世界的问题，在 HEP 中亦如此。简括地说，发展中的国家在 HEP 中是看不到的，而一旦看到了，他们的科学家常常是在欧洲或北美工作与生活。例如，1965 年，世界高能物理学家约有 6% 是印度人，只有 2.4% 受雇于印度。

高能物理学家在哪里发表他们的论文呢？如所期待的，证明存在一个公认的级别，有些期刊的声望被判断为高于另一些期刊。60 年代相关于 HEP 的名次是：《物理评论快讯》、《物理评论》（这两个期刊都属于美国物理学会）；《物理快讯》（欧洲，在荷兰）；以及《新实验》（属意大利物理学会）。

HEP 实验迅速发展成为大型合作科学，以许多科学家的合作为其特征，完全不同于卢瑟福或居里型的个体科学家的工作。当然，一篇论文以二三十位物理家的团队共同署名，是常见的事，而且，这只是开始。要注意的另一点是：HEP 中实验与理论之间关系的变化。理论家的数目增长得比实验家迅速，而且，两者愈来愈分离。到 1968 年，HEP 中 682 名美国高级研究生中有 316 名是理论家。只有个别的情形中，年轻的理论家融合到实验文化中去，或者，反之亦然。约在 1970 年，在弱相互作用中发表过两篇或以上论文的年轻物理学家中，在其第二篇论文中有 94% 的进路是跟第一篇论文中的一样（就是说，不是理论进路就是实验进路）。

第二十二章 | 各种基本理论

QED

如第 13 章所述，电磁相互作用的量子理论——量子电动力学，或 QED——是 20 世纪 30 年代许多讨论的主题。当时，许多物理学家觉得把常规理论发展成为一个理论上令人满意、实验上富于成果的一个理论是不可能的。由于在应用中出现各种无穷大，很少有希望取得基本的进展。在战争期间，这些问题暂时被搁置一旁，当时大多数物理学家忙于其他事务。但 1945 年以后，有时间对无穷大发起攻击了。虽然突破不是直接由新的实验结果引发的。理论与实验在 1947 ~ 1948 年间的并肩发展导致了 QED 的一种新理论。

1928 年，狄拉克关于氢原子的理论，再现了实验确认的索末菲尔德的精细结构公式。它一般被认为是无可挑剔的。可是，这理论忽略了电子与自场的相互作用，而 20 世纪初的实验表明：氢 H_{α} 的结构并不准确地适合于理论的预言。关于这种不一致有几种揣测，如果它是真实的，那么，它就是对于库仑定律的偏离所致。1938 年，加州理工学院的西蒙·帕斯特纳克提出 10 年后



称之为兰姆移位的东西。但在当时，实验状况不明朗，帕斯特纳克的思想尚未开发。只是在战后，哥伦比亚辐射实验室的维利斯·兰姆澄清了这个问题。应用复杂的微波技术（他在战时工作中熟悉了它），谱线的移位有了实验确证。1947年春，兰姆跟他的学生罗伯特·瑞瑟弗德一道证明：按狄拉克理论具有相同的能量的、两个氢原子态 $2S_{1/2}$ 与 $2P_{1/2}$ ，相间一个小能量，对应于波数 0.033cm^{-1} 。

兰姆移位的意义立即被 1947 年 6 月在纽约附近舌尔特岛“量子力学基础”学术会议的与会者们所承认。这个重要会议的参与者中有：贝特、维斯科普夫、克拉默斯、施温格与费曼，还有兰姆。他报告了他的结果。兰姆移位的理论意义是：它可归结于电子跟辐射场的相互作用因而可用来引导改进 QED 理论。兰姆移位的确是一种 QED 效应，这是在紧接这次会议之后首先被贝特证明的。贝特在一次临时的计算中将兰姆移位的主要部分作如下理解：他的计算是以质量重整化的一个简单形式为基础的。重整化的思想是战前被克拉默斯具体提出的。贝特的计算不是完全相对论的，下一步就是利用相对性不变量方法把它扩展并精细化。1947~1949 年间，这些计算被许多物理学家实施，包括兰姆和诺曼·克罗尔、维斯科普夫和布鲁斯·弗伦奇、施温格、费曼，以及友永与他的日本团队。结果完全跟实验一致，这是对重整化技术的一种确认。

朱利安·施温格对于新 QED 的精湛贡献是跟另一个精细实验相关联的。那就是电子反常磁矩的测量。1947 年一群哥伦比亚大学物理学家证明：磁矩之值略小于狄拉克理论的预言值。同年，29 岁的施温格开始发展他关于 QED 的一个自恰而协变的版本，并把它应用于计算兰姆移位与电子的反常磁矩。施温格的理论数学上是极其复杂的，但从数学丛林中走出来数值却跟实验漂亮地吻合。例如，电子的磁矩有一个 g 的因子，按照狄拉克理论，它

准确地等于2。但实验上知道它稍微大一点。1948年，实验给出 g 因子的值是2.00236，而施温格理论上发现 $g = 2.00232$ 。1948年春，在波克诺马诺会议（舌尔特岛会议的继续）上，施温格提交了他关于QED的协变表述。这理论以一系列论文的形式，发表在1948~1951年间的《物理评论》上。其中第一篇是一个对于磁矩计算的初等注释。施温格注意到：在他的新QED程式中“物质与辐射之间的相互作用产生电子电荷与质量的一种重整化，一切无穷大都包含在重整化的因子之中”。萨姆·施韦伯总结施温格工作的意义如下：“就其提供一个至量级 $e^2/\hbar c$ 的自恰量子电动力学，并展示一个至量级 $e^2/\hbar c$ 的无发散的哈密顿量而言，他的方法是普遍的，可取作量子力学地描述任何系统的出发点，包括在外库仑场中的电子、正子和质子。原先的各种理论碎片现在变成融合与统一在一个至量级 $\alpha [= e^2/\hbar c]$ 的自恰而紧致的量子电动力学之中。”（Schweber 1994, 309）

施温格和舌尔特岛会议的其他参与者不知道，一个跟施温格理论颇类似的理论已经在日本被友永与他的同事发展起来了。受到狄拉克的某些理论的激励，友永在战时以及战后不久在极其困难的外部环境下，发展他对于QED的协变重整化进路。据说，日本科学家是通过《每日新闻》首次获得兰姆移位的信息的。在跟奥本海默（他曾组织舌尔特岛会议，当时会议起着情报中心的作用）联系之后，1948年友永和他的合作者在《物理评论》上发表了他们的工作总结，包括兰姆移位的一项计算。友永表述其关于重整化思想的观点如下：“我们实际观察到的电子的电荷与质量都〔是〕修正后的量 $m + \delta m$ 与 $e + \delta e$ 。因此，即令 $m + \delta m$ 与 $e + \delta e$ 的理论值可能是无穷大，它们的实际值是有限的。因此，再一次地，在〔QED〕的计算中，……无穷大的困难可以被用有限的实验值取代理论值 $m + \delta m$ 与 $e + \delta e$ 而回避掉。……简言之，我们可以说，我们已经把所有的无穷大都包装进自由电子的自能



和真空极化问题之中。”(Schweber 1994a, 271) 在某种程度上, 友永的工作是平行于施温格的工作的, 但因它的发生跟美国 QED 的创造时期相隔离, 因而对施温格和费曼都没有影响。

QED 的第三个版本是里查德·费曼创造的, 他是另一位年轻的理论家。1942 年, 费曼在惠勒的门下获得博士学位。他的第一个科学工作是基于粒子间的直接相互作用重新表述经典电动力学。费曼的原创思想是利用他的无场来解释解决经典理论中的发散问题, 然后, 希望当该理论过渡到量子力学时问题也会消失。虽然事情并不是如此发生的, 但他早期的工作使他熟悉了时空的一般观念, 并导致他后来用路径幅来表述量子力学的思想。1947 年, 随着舌尔特会议和贝特关于兰姆移位的计算, 费曼开始发展他的另类高度原创的 QED 理论。这个理论以路径积分与计算为基础, 加上一个不久被称为费曼图的图解技术。他以论文形式在 1948~1951 年间发展他的理论, 包括他的经典论文《量子电动力学的时空进路》中的著名图解规则。论文发表在 1949 年的《物理评论》上。文中他满意地注意到: 虽仍存在理论问题, “然而, 在量子电动力学中, 我们确实有了一个计算物理过程至任何一级的、完全而确定的方法”。

1948 年夏, 重整化的 QED 有两个不同的版本: 施温格-友永表述与费曼表述。虽然两个版本给出相同的结果, 它们之间的关系远不是清楚的。这境况相似于 22 年前薛定谔理论刚出现不久时矩阵力学与波力学之间的对垒。1948 年, 弗里曼·戴逊在-项重要的工作中证明: QED 的两个理论实际上是等价的。戴逊是一位 25 岁的英国数学家, 两年前来到康纳尔大学研究量子场论。1948 年, 他完成了兰姆移位计算, 并认识到施温格理论与友永理论只是同一个理论的不同表述。第二年, 他用自己的方法推导费曼理论, 第一次把它表述为一种场论, 证明了施温格与费曼理论是等价的。由于戴逊的综合理论, 新的重整化的 QED 实质上完

成了。

作为 20 世纪 40 年代晚期新 QED 的一系列事件的重要性的标志，5 名对这一发展做出贡献的物理学家被授予诺贝尔奖：1955 年奖授予兰姆与波里卡普·库什，后者精确的确定了电子的磁矩；1965 年奖授予施温格、费曼和友永。虽然，重整化 QED 明显地是 5 位物理学家的 Work——施温格、费曼、友永与戴逊——不过，从事于场论并对它做出贡献的不限于这些人。但是，跟量子力学诞生时的 20 年代中期的境况相反，欧洲物理学家与研究所在重整化 QED 的形成期中不起重要作用。1946 年回到苏黎世的泡利密切跟随新理论的发展，但对它的形成没有做出贡献。唯一对 QED 做出原创贡献的欧洲人（戴逊除外，在这文化脉络中他被当作是美国人）是性格怪僻的瑞士物理学家恩斯特·斯丘克伯格。他在 1946 年前后达到了后来被施温格与费曼所得到的许多结果。斯丘克伯格的大多数论文用法语写成，被认为是很难读的和不清晰的。它们的价值只在 20 世纪 50 年代他死后才被承认。

战后 QED 的早期历史形成几点共识。首先，施温格与友永生活在极不同的文化环境中，他们各自独立地产生出重整化 QED 的相同理论。印证了科学史上这样的假说，即物理学的认知内容不太依赖于社会的文化环境。第二，很少有重要的理论突破像重整化 QED 那样本性是保守的。事实上，在取代或否定战前量子电动力学的意义上，年轻的有作为的物理学家清楚地意识到连续性，有意识地沿着业已确定的理论跟进。与老一代（像狄拉克、玻尔、海森伯等人）的革命态度形成鲜明的对照，施温格、费曼、友永与戴逊实质上是保守的与实用的。他们视量子力学与狭义相对论为理所当然，并询问这两个理论何以能够用来形成一个一致而有用的 QED 理论。第三，保守的态度跟实用的基本上非哲学的态度携手前进。对费曼来说，物理学是计算以及把计算结果同实验结果相比较的事务——不多也不少。他同意戴逊的一条实证信



条：“除非你把它计算出来，否则，你不能真正理解任何事物。”1953年，戴逊关于 QED 写道：“它只不过是这样一个领域，在其中我们选择了一个假说中的实验，并满怀信心预言结果至小数点第 5 位，该理论涉及了一切相关因素。量子电动力学给我们什么是一个电子的一个完全的描述；因此，在一定意义上，它给我们什么是一个电子一个完全的理解。只有在量子电动力学中，我们的知识才如此地准确，以至我们可以感觉到我们掌握着基本粒子的本性。”（Schweber 1994a, 568）

场论的沉与浮

经过从 1947 ~ 1949 年 QED 的成功发展之后，人们高度希望，量子场论（QFT）的类似方法也可应用于其他基本相互作用之中。可是，这些希望不是立即实现的。用卓越理论家斯蒂芬·温伯格的话来说，50 年代所发生的反倒是：“过不了多久就是另一场信心大崩溃——在物理证券交易所中量子场论的股票大跌，从而开始了第二次萧条，这次萧条差不多持续了 20 年。”（Weinberg 1977, 30）这场 50 年代中期以 QFT 在高能物理学共同体中广泛失宠所显露出来的危机，有多种原因。第一，少数物理学家就是不喜欢重整化 QED，因为他们觉得它缺乏理论根据，因而不可能是一个真正的基本理论。广泛认为重整化是一种数学技巧，但大多数年轻的物理学家并不介意，只要技巧管用就行。介意群体的头是狄拉克，他在 20 ~ 30 年代的工作一直是任何版本 QED 的实质。狄拉克强烈地感到：利用重整化程序来摆脱无穷大是“丑陋的”。量子力学的另一名老战士，列夫·朗道，批评也不逊色。跟一群理论家一道，朗道坚持：QFT 是值得怀疑的，因为它是建立在诸如因果性、定域的场算符以及微观物理水平的连续时空等非观察量的概念上的。在 1959 年基辅的一次会议上，朗道提议

放弃 QFT 作为基本理论，用一个基于可观察量，如散射幅以及同等基本的复合粒子概念的理论取而代之。

朗道的激进主张，是类 QED 场扩展到强与弱相互作用的失败中孕育出来的。费米 β 的衰变理论，以及 1958 年费曼与盖尔曼作为费米理论的宇称不守恒的扩展 $V-A$ 理论，证明是不可重整化的。同样，当物理学家寻求把 QFT 应用于强相互作用粒子的研究时，他们也取得小小的成功，在表述强相互作用的重整化 QFT 中没有特别的麻烦。但是，这些理论实际上是没有用的，因为它们并不导致可靠的预言，因而在效果上是不可检验的。由于这个或那个理由，1960 年前后，QFT 处于其低谷。当时许多物理学家追随朗道劝告，放弃该理论。按照戴逊的说法，“许多人现在对场论与强相互作用的相关性深表怀疑。场论反抗着现在时髦的 S 矩阵。”戴逊相信，“那是很容易想象的，几年后场论的概念会从高能物理学的日常工作字典中完全消失。”（邮政电报，1965 年 6 月 21 日）温伯格，另一位领导级场论理论家，不比戴逊乐观。1964 年，他写道：“现仍不清楚，场论是否继续在粒子物理学中起作用，或者，它是否最终被一个纯 S 矩阵理论所取代。”（Cushing 1990, 160）

对 QFT 缺乏信心，特别是相对于强相互作用，被一个强大的另类理论， S 矩阵理论的存在而恶化。这理论是早在 1943 年海森伯试图发展一个没有无穷大的相对论量子电动力学时表述的。海森伯 1943 年的工作是有意套用其 1925 年的量子力学，像那理论一样，完全基于可观察量。作为这样的量，他选用散射或 S 矩阵代表一个物理系统从初态 ψ_i 跃迁到终态 $\psi_f = S_{fi}\psi_i$ ，这里散射矩阵 S_{fi} 的平方给出跃迁几率。战后，海森伯理论被克里斯蒂安·莫勒、恩维特·斯丘克伯格、沃尔特·海特勒和其他人所发展。但到了 1950 年，原始的纲领大部分停止了。由于重整化 QED 的问世，数学复杂的海森伯理论似乎再没有必要了。反正都一样，



S 矩阵的思想继续存在，并且，到了 20 世纪 50 年代中期，变成并入到强相互作用的理论当中，被称为“分析的 S 矩阵理论”。有些物理学家，包括盖尔曼认为 S 矩阵是跟 QFT 互补的，或者，是表述强相互作用的量子场论的一种形式方法。但 1960 年前后，别的理论家开始采取一种更激进的立场，并且不久就把 QED 视为 QFT 的对立面。这群反场论的最突出者是加利福尼亚大学贝克莱的乔弗瑞·丘。在 1961 年一次讲座中，丘略述了他跟 QFT 划清界限的思想，并预告基本物理学面临的一场革命。“常规的场论，”丘说，“相对于强相互作用是贫乏的。而且，……像一个老兵一样，他命定不死，只是逐渐消亡。”（Cushing 1990, 143）两年后，丘又用另一个比喻来表达他的信念：“新的女仆 [S 矩阵理论] 充满神秘性，但也相应地充满希望。老女仆 [QFT] 抓住旧传统以维持其地位，但她的日子过去了。”（出处同上，175）

丘的 S 矩阵的实质，也称为靴带理论，是从 1961 年到 1966 年发展起来的。它可总结如下：丘否认存在还原意义上的基本粒子；就是说，他认为所有粒子都是复合的，或者，你喜欢的话，都是基本的。这种核内民主的思想包含着“靴带”机制的观念。即一切强子都是从理论的数学结构中自发产生出来的。例如，质子的质量必须具有它作为相互作用动力学的一个结果所赋予的值（这特点使人回想起别的一些极其宏大的理论，例如，爱丁顿的）。第二，这理论直接基于粒子的动量。在跟场论的鲜明对照中，它无视被指称为微观时空连续统一的形而上学概念。虽然，这理论与量子力学一致，但它不对一个定义于每个时空点的波函数 $\psi(x, y, z, t)$ 进行操作。第三，从方法论的角度，如同其激进一样，丘的 S 矩阵理论是极其宏大的。按照靴带假说，一切有物理意义的量都能作为自治性要求从 S 矩阵中唯一地推导出来。强相互作用粒子的质量、自旋和电荷，以及这些粒子的数目都被理论所确定，而不是被经验所指派。“靴带要求不用基本的

东西而是通过自恰性来理解自然，相信一切物理学从其成分相互以及与自身之间的一致性要求流出。所有成分都不是任意的。”（Chew 1970, 23）原则上，丘提议，一个像 S 矩阵的理论应该说明物理学定律是唯一可能的定律，他甚至称 S 矩阵理论是“新科学的先驱，跟我们在精神上所知道的任何东西如此地不同，以至无言可表”（Chusing 1990, 180）。然而，丘鼓吹一个有限的靴带假说，那就是只对强子有效的假说，他否认靴带假说可以作为一个整体扩展到物理学。

在 20 世纪 60 年代， S 矩阵的理论在强相互作用中很有影响力，它在哲学上受到许多物理学家的欢迎，并取得了几项科学的成就。虽然完全效法丘反 QFT 的物理学家很少， S 矩阵理论的一般观念却是很普及的。盖尔曼和别的一些物理学家被 S 矩阵理论所激励，也对它做过贡献，但没有明显地接受显然跟夸克概念相悖的、核内民主的思想。在他们看来，在 QFT 与物理学中庸的 S 理论革命之间没有不可调和的冲突。丘的 S 矩阵纲领是物理学中革命失败的一个例子。到 60 年代晚期，它遭遇困难，并且，随着 70 年代初夸克理论和规范场论的成功发展，这个宏大的理论多少瓦解了。在许多方面， S 矩阵理论是一个宏伟而诱人的理论。但是，它许诺得多、给予得少。不久，它就变成了如此无望地复杂，以至在 60 年代晚期，不止一个物理学家把它比作哥白尼革命前不久的托勒密天文学。另一个问题是该理论仅限于强相互作用，关于弱与电磁相互作用只字未提。如有人批评的， S 矩阵理论是“跟电磁场的存在不一致的。因为电磁场被包含于我们的测量与观察手段之中，所以，这是一个严重的缺陷”（Stern 1964, 43）。跟 50 年代人们对 QFT 的兴趣凋谢了一样，70 年代人们对 S 矩阵理论的兴趣凋谢了。两种情况并非证明理论错误而移位，而是因为它们无能力产生新的相关实验——在 QFT 情形中，这种无能是暂时的。具讽刺意义的是：丘在 1961 年把 QFT 比作一名老



兵，“他命定不死，只是逐渐消亡。”这个比喻应该是有效的，只不过不是对 QFT 而是对 S 矩阵理论自身。

规范场与电弱统一

70 年代初，高能物理学经历了一场暴风雨式的发展，它渐渐转变为一种有时称之为“新物理学”的状态。70 年代粒子物理学的新颖性主要基于两个理论的发明：量子理论的规范理论和量子色动力学。第一种理论是特别应用于弱相互作用的一般理论，而量子色动力学则是强相互作用的或强子的夸克理论的一种扩展。

规范（或标度）不变性概念，原先是由厄曼·外尔在其 1918 年失败的企图统一电磁作用与引力作用中引入的。当量子力学问世时，外尔和其他人重新表述了这个思想，简单地说，波函数的位相选择波方程。外尔理论的量子规范不变性出现于 1929 年。经过 25 年这个概念才转化为一个有功效的动力学原理。1954 年，普林斯顿高等研究所的杨与罗伯特·米尔斯紧密效法 QED，构造了一个强相互作用的定域的规范不变性场论。杨-米尔斯理论是由一条规范对称性支配的，它确保相对于一定的、依赖于位置与时间的变换基本方程是不变的。杨-米尔斯发现：重矢玻色子（自旋为 1，宇称为正）的三重态，跟理论相关联，其方式犹如光子相关于 QED。不幸的是，实验上不知道这些粒子。因为 QED 与杨-米尔斯理论的密切相似性，所以，矢玻色子被假定对应于长程力是无质量的。由于弱与强相互作用都是短程的，所以，如果这理论有用的话，不清楚应该把它应用于自然的哪个领域。杨-米尔斯理论被认为在数学上是有趣的，但很少或没有物理用途。10 年以后，人们才认识到：这个“无用的”理论，实际上对于命定要改变高能物理学的、一种新的规范场论传统来说，具

有基本的重要性。

早在 1938 年，在华沙会议上，奥斯卡·克莱因提议：自旋为 1 的粒子在弱相互作用中媒介衰变起着类似于光子在电磁学中所起的作用。克莱因假说是试图表述一种统一场论的努力的一部分，用后来的话来说，这是包括强力、弱力与电磁力的统一。这种意想很少被人注意，但几乎 20 年后，施温格在试图产生一个弱与电磁相互作用的理论中用上了这一意想。1957 年，施温格尝试他的理论包含这样的思想：光子与两个带电的杨-米尔斯交换粒子 (W^+ , W^-) 是同一个家族的成员。4 年后，谢尔登·格拉肖，另一位哈佛大学的理论家，提出一个有三个有质交换粒子的规范理论，除了 W^+ , W^- 以外补充了一个 Z^0 粒子。格拉肖的理论和由阿布达斯·萨拉姆与英国的约翰·沃德提出的理论类似，描述了电、弱相互作用。前者宇称守恒，后者宇称不守恒。从理论中未导出中间矢玻色子的质量。其实，理论不能证明为什么玻色子跟光子相反，却都具有质量。

1967 年，格拉肖-萨拉姆-沃德模型的一个改进版本，首先被斯蒂芬·温伯格，后不久被萨拉姆，一位在伦敦帝国学院工作的巴基斯坦物理学家发表。获得诺贝尔奖的温伯格与萨拉姆的电弱理论用到了一个所谓的对称性自发破缺的概念。这概念原是 1961 年约奇罗·纳姆布与其他人在超导性理论中引入的。在纳姆布的工作的激励下，1964 年，英国理论家皮特·希格斯提出一个机制，利用它可以产生出杨-米尔斯规范理论中粒子的质量来。一个类似的提议被比利时的罗伯特·布罗特和弗朗科易斯·恩格勒特独立地提出。温伯格与萨拉姆把希格斯机制应用于确定他们电磁作用中粒子的质量。希格斯关于产生质量的、对称性自发破缺地机制，现在被认为是理论物理学的一个里程碑。他的论文曾被《物理快讯》所拒绝。那正是粒子物理学被 S 矩阵理论所主宰、而 QFT 不吃香的时期。“意识到我的论文没有销路，”希格斯后来



回忆说。他改写了文章，把它投向《物理评论快讯》，这次，它被接受了。

20 世纪 70 年代，温伯格-萨拉姆理论逐渐成为对于新生的统一纲领的开创性贡献。但在头几年里，这理论极大地被忽视。下面括号内列出对于温伯格论文的引用次数，从中可以看出它在早期缺乏影响。1967(0)，1968(0)，1969(0)，1970(1)，1971(4)，1972(64)，1973(162)，1974(242)。括号内数字包括自参考。这表明：即使温伯格本人开始时也没有发现他的工作特别重要。1972 年发生的接受程度的变化，相关于承认温伯格-萨拉姆理论不仅是一个紧致的电弱规范理论，而且是一个可重整化的理论，从而，跟 QED 一样具有可重现性与可计算性的属性。这是被 25 岁的丹麦物理学家吉拉达斯·特霍夫特首先证明的。他证明：一大群（非阿贝尔）规范对称理论，电弱理论属于其内，是可重整化的。证明的另一个版本稍后被一位朝鲜-美国物理学家本亚敏·李提供。特霍夫特与李的证明是重要的。只在那时，温伯格-萨拉姆理论才转变为一个可运作的理论，更一般地，规范理论才被认为是相互作用的深刻理论。正如物理学家悉尼·科尔曼在一篇论授予温伯格、萨拉姆与格拉肖的诺贝尔奖的文章中所表达的，特霍夫特的文章“揭示了温伯格与萨拉姆的雾是一个令人着迷的王子”（《科学》1979 年 12 月 14 日）。1971 年开始的“规范场革命”使 QFT 获得新生。

温伯格-萨拉姆规范理论的可重整化和理论上受欢迎，在与实验一致的意义上，它也是正确的吗？像早期格拉肖模型一样，理论预示了光子的一个有质伙伴，它在无电荷跃迁的入射与出射粒子耦合中媒介弱相互作用。这种“中性”流过程涉及假说中作为携带粒子的 Z^0 ，它是温伯格-萨拉姆的统一理论不同于早期弱相互作用理论的特色。直到中性流被实验所确立，温伯格-萨拉姆理论才被认为是实验上令人满意的理论。中性流在美国（费米

实验室)和欧洲(CERN)两地寻找。1973年夏,CERN的实验家宣布他们发现了中性流,那是分析中微子与中微子过程所得出的结论。CERN成功的关键仪器是“Gargamelle”,一台法国造的、20吨重的气泡室。CERN的结果最终于1974年被费米实验室作的中微子实验所确认,虽然这确认来得晚了点。对于这结果曾有疑虑,并且,有一段时间,美国物理学家——以及大多数高能物理学家——相信中性流并不存在,是CERN搞错了。然而,到了1974年夏,不确定性消失了。从那时起,中性流牢固地确立。中性流的发现等于是对于1967年的温伯格-萨拉姆规范理论的一种确认。

温伯格-萨拉姆理论是一种电弱相互作用的理论,而通过夸克模型,它跟强相互作用有一种明显的关系。开始时,约从1967~1974年,似乎4个轻子(e, ν_e, μ, ν_μ)精美地是4个夸克(u, d, s, c)的镜像。这跟人们从统一观点所期盼的一致。1974年,马丁·佩尔与他的合作者分析了在新近建成的电子-正子储存环或对撞机SPEAR上从电子与正子碰撞中收集到的资料,斯坦福团队发现了一个新粒子的证据,可能是一个超重子(τ),它是成对产生的,并且,衰变成 μ 子或电子(例如, $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \mu^+\mu^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$)。佩尔及其团队所分析的资料未立即作为 τ 粒子存在的证据被人承认,并且,迟至1975年,佩尔和他的35位合作者谨慎地写道,他们对资料“无法作常规的说明”;作为一种非常规的说明,他们建议“产生一对新粒子并衰变了,每一个具有量程在1.6至2.0 GeV/ c^2 的质量”(Cahn and Goldhaber 1989, 300)。他们知道他们发现了某种新东西,但不能肯定它是什么。显示他们没有把握,他们有时称之为 U 粒子,意指不知道。(讽刺的是,40年前汤川引入了另一种 U 粒子,后来称为 π 子。)一年后,在汉堡的PETRA(正子电子探测循环加速器)上。德国人的实验确证了斯坦福大学的结果,进行的一系列实验,使混乱结束了。提供了重量为1.8 GeV、寿命为 10^{-13} 秒的粒子存在的最后



证明。伴 τ 中微子 ν_τ 被假定，而不是被探测到。接受 τ 轻子（或 τ 子）意味着夸克与轻子之间的对称性——或者，强与弱相互作用的对称性——不再令人满意了。两个新夸克味是需要的，而且，如我们不久就会看到的，它们后来被发现了。在70年代晚期，量子色动力学与QFT变得跟电弱理论密切相关了。自然，现在挑战性任务就是重复QED的成功，并把电弱温伯格-萨拉姆模型扩展到强相互作用中去（见第27章）。

在其1979年的原先提到过的评论中，科尔曼描述70年代电弱理论发展如下：

1973年，CERN与费米实验室的实验探测到中性流事件……形式与大小跟理论一致。随后的5年，是一个兴奋与失望、警告与探索交错的时期。实验验证理论；实验否认理论。大量的、理论上的努力产生跟新的实验结果相一致的怪诞而变易的版本；新的实验被证明是错的；变易的理论被扼杀；在最后的几年里，实验境况似乎稳定地与理论的原始版本一致。温伯格-萨拉姆模型现在是弱相互作用的标准理论。

科尔曼所说的“变易理论”，是指那些设计用来说明开始不能被弄得跟温伯格-萨拉姆格理论一致的种种反常的理论。

就三个“弱子”——中间矢玻色子——仍是假说粒子而言，电弱理论的成功是不完全的。80年代情况发生了变化，那时在CERN与费米实验室的新的质子反质子对撞机产生的能量足以产生有质粒子。CERN的实验是相对廉价的，其技术基础是利用已有的储存反质子于环中并让其跟同一环内的质子碰撞的设施。CERN对撞机于1981年夏开始产生碰撞。1982年秋就出现了有W粒子的苗头。1983年1月21日，CERN物理学家宣布他们发现了

衰变为一个电子和一个中微子的 W 粒子的 10 个候选者， W 的质量发现是约 80GeV ，跟理论一致。半年以后，通过衰变为 e^+e^- 与 $\mu^+\mu^-$ 探测到了 Z 粒子，质量是 95 GeV 。没有一项发现是令人诧异的。它们很快被 CERN 与费米实验的进一步实验所确证，而且，CERN 的物理学家卡罗·鲁比亚和西蒙·范德梅尔很快为他们的发现被授予 1984 年诺贝尔奖。意大利人鲁比亚是实验计划的后台策划人与质子反质子对撞机的先驱；而德梅尔则发展了生产集中粒子束弹丸的关键技术。当然，在这项发现中牵涉到许多物理学家，而不仅是两名奖项获得者。现代高能物理学的规模被这样的事实所说明：两篇发明论文（一个探测团队是 UA1，另一个探测团队是 UA2）的作者，不下于来自 11 个不同研究所的 126 名物理学家。

量子色动力学

如第 21 章所述，1964 年盖尔曼与兹外希提出强子（强相互作用粒子）由称为夸克的带分数电荷的粒子组成。60 年代中期，夸克模型并没有引起太多的关注。七八年后，它才在强相互作用中占据中心地位。1967 年由斯坦福直线加速器中心与麻省理工学院的物理学家用质子对电子的非弹性散射进行的实验给出的结果使理论家们困惑不解。直到费曼在 1972 年把他的理论中不寻常的散射截面解释为质子含有点状散射中心的迹象，才拨开了谜团。他称那些散射中心为部分子。在高速碰撞中，部分子实质上起独立粒子的作用。费曼的部分子模型提供了理解许多实验的方便构架，不久就被广泛接受。许多物理学家倾向于把部分子等同于夸克，不管两个强子之间存在相当的区别。例如，夸克是紧紧地禁闭在强子内的，而费曼的部分子则实质上为自由实体。1971 年当斯坦福直线加速器中心的实验用自旋为 1 的部分子解释时，部



分子 = 夸克的假说受到支持。然而，更强有力的支持来自 CERN 的中微子质子实验。那里新的 Gargamelle 气泡室为产生部分子模型提供了令人信服的证据。1973 ~ 1975 年间，德国人团队发表的实验结果，被认定为部分子就是带分数电荷的夸克的证明。这个结论也获得强子反应实验的支持。

部分子模型的进一步支持来自于理论的发展。1973 年美国理论家戴维·波利泽、弗朗克·维尔兹克和戴维·格罗斯发现杨-米尔斯型的规范场论是“渐进自由的”，这意味着在极短的距离内（甚高能量），强度将逐渐减小，渐进地趋于零。这个重要结果说明：自由部分子的费曼模型假说如此之成功：它跟一切关于强子物理学所知道的事实相一致，并且，它使详细的计算成为可能。一般地，渐进自由对 QFT 的有效性给予强大的支持，为夸克规范场论铺平了道路。在原先的夸克模型中，夸克是以“味”量子数表征的，它可以是 u 、 d 或 s 。1964 年，马里兰州立大学的奥斯卡·格林伯格提出需要第二个量子数。格林伯格指出某些基本粒子的组成，如 $\Omega^- (sss)$ ，如果三个夸克是同一的，并不遵从泡利原理。他的建议第二年被纳姆布与其他规范理论家所发展。按照纳姆布理论，夸克除了“味”还带“色”，所以每个夸克味都相关于三种色（“红”、“绿”与“蓝”）。色被视为是电荷的一种类比，但不期望跟已知的强子有什么关系，强子是被视为无色的。因为这个理由，有段时间，夸克色被认为只具有理论意义。可是，70 年代初的实验表明：情况不是这样的。这些实验表明：色确实存在，色夸克是分数电荷的，如味夸克一样。

1974 年秋，量子色动力学的地位——强相互作用的规范场论——急剧地变化。当时量子色动力学与它的字母缩写 QCD（类比如 QED）还未铸定。（这名字似乎是 1987 年出现的，由盖尔曼提出。）1974 年 11 月 11 日两组美国物理学家宣布他们发现了一种高度不寻常的基本粒子，它被认为是夸克味“粲”的一种显

示。在盖尔曼与兹外希提出原始夸克理论后不久，格拉肖与詹姆斯·布约肯就提出：这种味应该存在，粲夸克有 $2/3$ 的正电荷，并且，粲数（像奇异数）在强于电磁相互作用中是守恒的。可是，因缺乏实验支持，格拉肖-布约肯假说被忽略了 7 年。在“11 月革命”中粲夸克的发现不仅确证了夸克理论，而且，意味着这是一般的规范场论与具体的量子色动力学的胜利。

1972 ~ 1973 年间，关于电子-正子湮没的实验资料跟理论的期待不符曾广泛被视为是对于部分子假说的威胁。但是，当 1974 年 11 月发现 J/ψ 粒子时，不快的局面急剧改变。从受到失败的威胁变到完全的成功。这粒子是被丁肇中领导的小组在布鲁克哈芬的质子-核碰撞实验中，以及被贝顿·里克特领导的小组在斯坦福 SPEAR 的电子-正子碰撞实验探测到的。丁肇中小组几个月前就有重介子的证据但不能肯定这证据是真实的还是人为的，仅当丁听到 SPEAR 的结果时，他才意识到他已经有了重大发现。丁与里克特为其发现丁称之为 J 、里克特称之为 ψ 的粒子共同获得 1976 年诺贝尔奖——因此一般称为一个复合名字 J/ψ 。这粒子具有不寻常的寿命，质量为 3.1 GeV （质子质量的 3 倍），不同寻常的重。它是从电子-正子湮没生成 γ 量子而产生的，衰变成一些强子。几周之后，另一个质量为 3.7 GeV 的新矢介子（ ψ' ）被发现。第二年，属于同一家族的其他重的、长寿命的许多粒子接踵而至。看重 J/ψ 的理由是；它以及其他新粒子被视为是称为粲的新夸克味的显露。例如， J/ψ 可视为一个粲夸克与它的一个反夸克的一种组合。简言之，在“11 月革命”中，粲被发现，而这发现把量子色动力学与夸克模型转变为现实。它等于是发现了（禁闭）夸克是强子的实在组成部分。1976 年， D -介子的发现进一步确证了粲的存在。这些介子被解释为裸粲的多重态，就是说，“通常的”夸克（ d ）与粲夸克的组合。大多数物理学家得出结论：夸克已被发现是真实粒子，不只是数学实体了。没有几个人



聆听核内民主鼓吹者的说教了，反对海森伯的人就更少了，海森伯在 70 年代坚持：一个统一的理论应该具备方程的基础对称性。而不是以基本粒子的观念为基础。

到 1976 年，承认有 4 类夸克存在： u ， d ， s 和 c 。随着 τ 粒子的发现，承认它属于“第三代”。夸克-轻子的对称性又一次被打破。为了恢复对称性，需要两种新的夸克味。一个向往中的味来得正当其时。1977 年，哥伦比亚大学的利昂·列德曼宣布他在费米实验室的团队在 $\mu^+\mu^-$ 湮没中发现了一个很重粒子的证据，重 9.5 GeV（约 10 倍质子质量）。这个称为 Y 的粒子是第 5 个夸克味的一种形态。如 1974 年的实验解释为粲夸克的一次发现一样，1977 年的实验被视为 b 夸克（ b 表示“底”或“美”）的一次发现，它的电荷是 $-1/3$ 。 Y 的夸克组成是 $b\bar{b}$ 。第 6 个和最后一个夸克， t 夸克（ t 是“顶”或“真”的意思）在很久以后的实验中才出现。但是，尽管缺乏实验根据，一般都认为它存在。到 1980 年，被接受夸克的数目已增加到 6 个（ u 、 d 、 s 、 c 、 b 和 t ），对应于 6 个轻子（表 22.1）。讲完这个故事，1995 年，一组费米实验室的物理学家发现了顶夸克。这个顶夸克极重，约有 176 GeV，与理论一致。因此，这项发现是量子色动力学与电弱理论的又一次成功。

随着新介子与夸克的发现，量子色动力学开始主宰强相互作用。按照这理论，强子不仅由夸克组成，而且，由无质量的、保持夸克捆绑在一起的“胶子”所组成。作为理论实体，胶子从 1971 年就被研究，当时有些物理学家把中性部分子作为胶合分数电荷的夸克在强子内的证据。1979 年，新的 PETRA 储存环中的“3 注事件”实验被解释为涉及夸克与胶子的相互作用时，胶子获得了一种实在的测度。电子与正子的碰撞被认为按 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$ 的反应发生，这里 q 表示胶子。虽然，欧洲物理学家强调：他们实际上没有“发现”胶子；但出版物则是按美国物理学家的理解来

表 22.1 1995 年前后所知道的基本粒子

名称	符号	电荷 (e)	静质量 (MeV)
夸克			
上	u	$+2/3$	360
下	d	$-1/3$	360
奇	s	$-1/3$	540
粲	c	$+2/3$	1500
底	b	$-1/3$	5000
顶	t	$+2/3$	176000
轻子			
电子	e	-1	0.51
μ 子	μ	-1	107
τ 子	τ	-1	1784
电子中微子	ν_e	0	0
μ 子中微子	ν_μ	0	0
τ 子中微子	ν_τ	0	0

注：反粒子未计入。

广泛地解释实验的。这种情况激起英国期刊《新科学》质疑道：“〔胶子存在〕的根据是微弱的，那么，为什么这些结果特别在美国如此被炒作呢？”这期刊的回答是：“唯一的结论似乎是：美国物理学家力图保持前驱势头让联邦政府向他们高昂的研究进行投资。为达到更高能量的下一代加速器的战斗已经打响。所以，物理学家需要证明未来的经费是会有回报的。”（Pickering 1984a, 344）然而，胶子的发现证明是足够真实的。到 1979 年末，在 PETRA 以及在其他实验室进行的进一步实验已证实了上述关于胶子的解释，而且，胶子已被探测到的结论已被广泛接受。

第二十三章 | 宇宙学与相对论的复兴

趋向大爆炸宇宙

如果说，1932 年是核物理学奇迹迭出和粒子物理学开端的一年，那么，1917 年可恭贺为理性宇宙学诞生的一年。当爱因斯坦基于他新近提出的广义相对论建议他的宇宙学场论方程时，大尺度宇宙学研究就被置于新的基础上了。在第二次世界大战中期，爱因斯坦开创性的、发表在《普鲁士科学院进展》的论文的标题是《涉及广义相对论的宇宙学考虑》。8 年后，爱因斯坦的工作仍然是考虑科学宇宙学的基础。

当爱因斯坦发表其理论时，关于星系的统计学和运动学方面的知识是少得可怜的，而且，理论宇宙学与观察宇宙学之间的鸿沟很深。虽然星系退离的第一批观察可追溯到 1912 年，并且，在 20 年代，就有天文学家猜测到距离与退离速度之间的一种关系。但一般地，在相对论宇宙学的第一阶段，观察不起很大作用。在这阶段，从 1917 年到 1930 年间，普遍接受宇宙是静态的。少数理论宇宙学家所关注的主要问题是满足场方程的两个静态模型进行比较。按照爱因斯坦模型，宇宙是闭合的；而按照荷兰

的威廉·德席特的模型，宇宙是开放的与无限的（但缺乏物质）。只在1930年，埃德文·哈勃确定了星系以正比于其距离的速度飞开来之后，静态规范才崩溃，人们才认识到宇宙在膨胀。1927年，比利时的乔治斯·列马特瑞已经获得这一洞见。早在1922年，俄罗斯的亚历山大·弗里德曼在理论上提出过这种可能性。直到1930年当它们被重新发现时，弗里德曼与列马特瑞的工作一直被人忽视。在接下来的20年里，大多数天文学家与物理学家接受宇宙膨胀学说，以同哈勃的观察数据以及相对论场方程的弗里德曼-列马特瑞解相一致。最大众化的宇宙学模型或许是列马特瑞-爱丁顿模型。按照这模型，宇宙从无限远过去的静态爱因斯坦态开始其膨胀。另一种演化模型是列马特瑞在1931年提出的，那就是，膨胀是从一个“原始的原子”开始膨胀的。因此，宇宙可以委归一个确定的年龄。这第一个大爆炸模型开始时遭受冷遇，但在30年代末，被广义相对论定律描述的、关于演化的和年龄有限的宇宙的一般观念，愈来愈获得尊重。可是，不是所有的专家都接受相对论基础，存在许多竞争的理论。讨论最多的是爱德华·米尔恩的异类理论（见第十五章）。

两次大战之间期间的宇宙学家没有职业的同一性。他们是数学家、理论物理学家、天文学家，以及部分时间从事天文学问题研究的物理化学家的一个不平凡的混合体。虽然，跟宇宙的几何或时空方面相比较，宇宙的物理学方面扮演次要角色，但是，物理过程的种种考虑不是全无的。例如，在1928~1932年间的一系列论文中，美国物理学化学家里查德·托尔曼考察了静态宇宙与膨胀宇宙的热力学。早在1922年托尔曼在不成功地试图说明氢与氦两元素的相对丰度中，研究了这两个元素的平衡。列马特瑞在1931年写了一个关于大爆炸理论的简要注释，用了显赫的标题《从量子理论观点看世界之初》，量子物理学第一次进入宇宙学，虽以一种暧昧与思辨的方式。比利时物理学家描绘了原始的



宇宙是“一个独一无二的量子”，在其中发生了“一种超辐射过程”，结果产生超-重的放射性元素。他提出：被假说的超-原子发射的粒子以宇宙辐射的形式继续与我们并存。列马特瑞的猜想是大胆的、视觉的和诗意般的；不幸的是，它们也是跟当时开始加速发展的核物理学不搭界的。最终确定宇宙学是物理学的一个分支的、富有成果的发展开始于 30 年代晚期。当时有几个核物理学家转向了天文物理问题，如天体能量的产生以及元素的丰度分布。

20 年代末，阿特金森、豪特曼斯与伽莫夫开创了核天文物理学；这个子领域获得了第一次令人瞩目的成功，即 1938 ~ 1939 年间著名的贝特理论（见第二十二章），贝特的工作是关于天体能量的产生不是元素形成的理论。因此，它并不直接相关于宇宙学。第一个核宇宙学理论包含于冯维兹瑟克的 1938 年理论之中，它是贝特稍后理论的一部较原始的版本。冯维兹瑟克极大地发展了核起源考古纲领——就是说，利用假说中的核过程试图重构宇宙的历史，并根据元素丰度的发生图像来检验它们。或者，如他在《物理杂志》中所说的，“从元素分布的频度做出关于这种分布有可能起源的、宇宙较早状态的结论。”按照维兹瑟克说法，“元素的形成十分可能发生于恒星之前，宇宙那时的状态是跟今天的状态大不一样的……温度的数量级相当于核的结合能完全转化为热 [2×10^{11} K]。伴随的密度很可能在核的密度附近。”（Kragh 1996b, 98）因此，维兹瑟克的图像是一个大爆炸宇宙的图像。虽然它是独立发展起来的，他的图像跟列马特瑞的原始原子假设是何等的相似呀。

维兹瑟克开创的纲领，被伽莫夫独立地发展为以核物理学为基础早期宇宙模型。值得注意的是：不论是伽莫夫与贝特，还是维兹瑟克，都没有经过天文学的正式训练。他们怀有对核动力与量子理论的信心，以物理学家的身份进入这个领域，顺道学习必

要的天文学知识。到 1939 年，伽莫夫从恒星迈向宇宙。经营着大爆炸宇宙的观念，但对于元素如何从原始氢的假设状态中形成的，仍然没有概念。问题是要再现一个对应于经验上已知的元素分布，在当时这就是由维克托·哥尔德什米德特 1937 年发表的资料。在 1942 年 4 月——美国宣布对日本、德国与意大利作战后的 8 个月——第 8 届华盛顿理论物理学术会议上，伽莫夫与其他美国物理学家达到了这样的结论：为了定量说明哥尔德什米德特关于较重元素的数据，一个大爆炸的宇宙是必需的。按照会议的报告，“元素起源于一个具有爆炸特征的过程，这过程发生在‘时间之始’，从而导致现在宇宙的膨胀。”（Kragh 1996b, 105）

大爆炸图像正获得动力，而驱动力就是核物理学。一小群物理学家与天文物理学家现在认识到：现在世界上的大块物质，或许是 20 亿年前（哈勃时间的流行接受值，粗略地是宇宙的年龄）某种高度压缩与高温的原始状态中所发生的过程的结果。这是一个主要的概念变化，但在当时没有发布新闻。这不仅是因为战争在进行中，而且，这结论也是暂时的与猜测的。为了发展成为一个正当的大爆炸宇宙学，所缺乏的是早期宇宙的核物理学与宇宙学演化的相对论模型之间的联系。在第二次世界大战期间，如此怪异的问题没有优先权，但战争结束不久，伽莫夫热情地转向这个问题。1945 年 10 月 24 日，伽莫夫庆贺玻尔寿辰时，“[我正]研究膨胀宇宙早期阶段元素起源问题，”伽莫夫对玻尔说，“这意味着把膨胀的相对论公式跟热核的、裂变的反应速率联系起来。一个有趣的问题是：原始裂变发生的（根据相对论的膨胀公式估算）期间必须在毫秒之内，而在继后不同轻核（如果有）之间建立起平衡的可行时间只有 $1/10$ 秒。”（Kragh 1996b, 106）

伽莫夫的“新进路”，如 1946 年所提出的，是以早期宇宙由按弗里德曼-列马特瑞方程膨胀的相对冷核子气组成的图像为基础的。1948 年，发展了一个大大改进了的版本，主要是跟他的博



士研究生拉尔夫·阿尔弗合作完成的，利用了直到那时才被归类的中子捕获截面的反应速率的新数据。甚早宇宙的图像现在是一个热的、高度压缩的中子气，不知怎的以膨胀开始，并衰变为质子与电子，有些质子会跟中子结合形成氘，再从这些核，较重的元素被假设通过相继的中子捕获与 β 衰变综合而成。伽莫夫在这里以及在后来的版本中，都没有试图回答什么引起20亿年前的膨胀与初始的中子衰变问题。伽莫夫与阿尔弗力图回避简单地给定关于宇宙起源的初始条件。他们认为： $t=0$ 时刻的开始，处于物理学王国之外。为此，他们从不用“大爆炸”一词称呼其理论。

1949年后期，伽莫夫与阿尔弗认识到：温度约为 10^9K 的原始宇宙必定由辐射而非物质主宰，这影响着计算的细节。更重要的是使阿尔弗和他的合作者罗伯特·厄曼得出结论：冷却后的原始辐射化石仍与我们同在。在1948年一篇论文中，他们计算了宇宙现在的背景温度是 5K 。在1948~1956年间，伽莫夫、阿尔弗与厄曼7次报道过关于宇宙背景辐射的预言。但是，尽管它为人所知晓，它的结果却全然没有引起注意。值得一提的是：直到60年代中期它被复苏以前，人们全然忘却了他们的预言。那时，伽莫夫和他的助手已不再活跃于宇宙学的研究了。反正都一样，宇宙的伽莫夫模型继续被人研究和精细化，原先被阿尔弗与厄曼，但偶尔也有别的核物理学家关注，包括像费米与维格纳一样的名流。如日本物理学家林1950年第一次指出的，一种初始宇宙只由中子所组成的原始假设，是站不住脚的。按照林的观点，必须把非中子衰变的过程加以考虑。这一考虑使他提出：早期宇宙是质子、中子与光子的混合物。以此为基础，林对于氢与氦的现有分布作了一个粗略的计算，其结果跟当时相当不确定的观察值一致。1953年，阿尔弗、厄曼与詹姆斯·弗林在一篇论文中，发展了一个更精细的模型，标榜为第10个经典的大爆炸理论。

利用核与粒子物理学的最新进展，3 位物理学家对始于初始爆炸后 10^{-4} 秒时刻（当时温度为 10^{12} K）的早期宇宙，提供了一个详尽而综合的分析。在阿尔弗、厄曼与詹姆斯·弗林的分析结果中，氢重的百分比是 32%，这数值跟从光谱分析得到的数值合理地吻合。

尽管 1948 ~ 1953 年间大爆炸理论取得令人鼓舞的进展，它却未能吸引人们的广泛关注。事实上，它被放弃了 10 多年。为什么一个现在看来实质上正确的理论，在 20 世纪 60 年代中期之前竟遭冷遇呢？像伽莫夫-阿尔弗宇宙学一样宏大而有抱负的一个理论，自然要面对许多问题，例如：它似乎不能说明星系的形成，以及更严重的是，它不能说明较重元素的形成。为了建造比氢重的元素，必须找到某种办法把质量数 5 与 8 之间（对它们没有核存在）的间隙连接起来。问题是：尽管付出了许多努力，仍没有发现正确的答案——这就是说，这答案应对应于早期宇宙的物理条件。失败意味着：伽莫夫理论的原始根据，元素在宇宙中形成，必须放弃。但是，失败并不等于否认理论。因为仍可能假定：虽然氢是宇宙中形成的，其他元素则是后来恒星内部核过程的产物。难于回避这样的结论：对于 1953 年以后人们对伽莫夫理论缺乏兴趣部分原因是跟理论本身的正误无关的社会因素。理由之一无疑是：理论必须具有鲜明的学科分支，而不是涉及物理学的两个领域。在当时，这两个领域广泛被视为不相同的。它是一个物理学的而不是天文学的理论，但是，把核物理学跟广义相对论结合起来是违反专业化趋势的，而专业化则是 50 年代美国物理学的特征。把趋势建立的核与粒子物理学跟（被认为是）尘埃宇宙学阻隔开来意味着：像伽莫夫之类的交叉学科研究计划，难于招募新人和吸引兴趣。所以，当 50 年代中期，伽莫夫从宇宙学漂移到分子生物学，在同一时期阿尔弗与厄曼的科学生涯转到私人工业时，没有人能接替他们的工作。



传统上，宇宙学被认为是一个介于科学与哲学的学问。为此，它要求一种不同于管理通常物理研究的方法。伽莫夫和他的核宇宙学小群体不同意这种观点。他们在训练与精神上都是物理学家，他们视早期宇宙是某种可以用通常物理学方法处理的东西。他们认为它是困难的问题，但不是跟别的核物理学问题性质不同。输入核物理学实验的数据，利用先进的计算机计算，就会给出正确答案。他们对此满怀信心，觉得没有必要引入新的原理，也无须为讨论宇宙的概念状态费喉舌。简言之，他们的态度是实用的与经验的。伽莫夫把自己视为一名宇宙工程师。并且，曾在某种场合，他把一个宇宙学家跟一个新汽车设计师相比较：作为工程师，必须依赖于已知的定律和材料，同样，宇宙学家寻找满足已知定律并跟实验数据一致的宇宙模型。这种态度跟宇宙学中主导态度是显然不同的，它可能是在欧洲培育的那种理论宇宙学对于伽莫夫研究项目的异化的贡献。一方面，伽莫夫的宇宙学带着的工程师思维特征极好地跟当时美国物理学普遍的实用精神吻合（见第二十二章）；另一方面，他的研究工作缺乏一个本来可能吸引物理学家兴趣的实质成分，即：实验的资料与检验的可能性。

稳态的挑战

1948年，不仅是伽莫夫大爆炸理论的一年，也是英国剑桥提出一个根本替代相对论演化宇宙学理论的一年。这个理论，“新宇宙学”或宇宙的稳态理论，是以两个版本提出的：一个由弗瑞德·霍伊尔；另一个由厄曼·邦迪与托马斯·哥尔德。两个版本的哲学观虽不同，它们的基础相同，并导致相同的观察结果。跟伽莫夫、阿尔弗和厄曼一样，霍伊尔、邦迪和哥尔德都是物理学家，都没有经过正式的天文学训练。这大概是这两组宇宙学家唯

一的共同点。

稳态宇宙学理论起源于：对于以相对论为基础的演化宇宙学的方法论的不满，特别不满那个关于宇宙有个起点或创造的假设。霍伊尔说创造不可能因果地说明，所以，如他在1948年的论文中所说的，这些理论是“反科学的求索精神的”。除了哲学上的反对意见，三位剑桥物理学家提出了所谓的时标的困难。这个问题是大多数大爆炸型相对性理论所共有的。按照这些理论，宇宙年龄是相对于哈勃参数的，即宇宙年龄小于退离速度的倒数（哈勃时间），1950年前后被认为是18亿年——极大地小于用可靠的放射性测时法测得的地球年龄30亿年。50年代后期，由于哈勃测量方法的改进，这个恼火的不一致消失了。但在1948年，那是一个实实在在的问题，相对论宇宙学家只能装着它并不存在。

霍伊尔、邦迪和哥尔德的解决办法是基于他们的另类假设，即：宇宙不仅空间而且时间也是均匀的。就是说，它在任何地点、任何时刻看来都一样。为了使静态的、无限老的宇宙跟星系的退离相一致，他们假设：在宇宙中，基本物质（例如氢原子或中子）每时每处连续地被创造出来。物质的创造必须以极慢的速率发生，致使这过程不能被直接观察到。尽管如此，它是一个根本不同的假设，因为它违背了久经考验的能量守恒和受人尊重的广义相对论。基于这些假设，稳态宇宙学家推导出宇宙是一个指数膨胀欧几里得空间，保持着恒定的物质密度 $\rho = 3H^2/8\pi G$ ，这里 H 是哈勃常数， G 是牛顿引力常数。从理论导出的众多结果之一是：在一个任意大范围的宇宙中，星系的平均年龄是哈勃时间的 $1/3$ ，或者，约6亿年。在60年代，这个理论本质上没有变化，除了1952年英国物理学家威廉·麦克科里用与广义相对论极相似的思路重新解释了它，并断言连续创生不一定会破坏能量守恒。麦克科里的天才解释包含许多洞见，后来在相对论宇宙学



中被重新发现。但在当时，没有引起关注。

从其 1948 年伊始，稳态理论遭到猛烈的反对，不仅因其违反常理的本性，也因为霍伊尔在意识形态上利用它来攻击大爆炸理论，以及他所宣称的该观点的宗教基础。在基督教信仰与宇宙创生的宇宙学观念之间存在一种暧昧的联盟，似乎在庇护十二世教皇，他宣称：现代大爆炸宇宙跟基督教义深深契合，提供了超验的主存在的强有力的支持，并得到了确认。虽然，宗教的与哲学的论据是议论的热门话题，可是，两个宇宙学理论之间的争论过程与结果并不依赖于这些议题。真正相关的是那些更具常规科学本性的论据，首当其冲的是观察的验证。在提供星系形成的似乎合理的机制方面，特别在提供比氦重的元素起源于恒星的成功核理论基础方面，稳态理论打了一些小胜仗。在 1956 ~ 1957 年间，霍伊尔跟英国的马格瑞特·伯比奇、乔夫瑞·伯比奇以及加州理工学院核物理学家威廉·福勒合作发展了一个重要理论，它是核天体物理学的一个里程碑。这个伯比奇-伯比奇-霍伊尔-福勒理论是建立在一个仅在恒星内部运作的、桥接质量 8 间隙的过程基础上的，从而跟大爆炸理论的假设相矛盾。然而，虽然 B^2HF （如它被称呼的）广泛地被视为稳态理论的一个论据，它并不排除对手大爆炸理论。霍伊尔所号称的胜利，与其说是实在的，不如说是心理的。

演化宇宙学家预言：对于遥远星系，星系的退离速率正比地增大。但是，按照稳态模型，退离速度正比于距离。因此，两个模型的真伪是可以用遥远星系的哈勃图来鉴别的。威尔逊山天文台的阿兰·桑德吉收集到的资料显示一个慢下来的膨胀，与演化观点一致，从而得出结论：资料跟稳态观点相矛盾。这数据还不足以构成双方皆接受的判决性检验。

50 年代一般形势的特征是再重复显示这两种理论的不同观察检验的不稳定性。有些检验有利于这一方；另一些则有利于另一

方。当1955年剑桥大学马丁·莱尔第一次把射电天文学方法应用于同一问题时，状态还是反反复复。莱尔发现强射电源分布跟稳态理论不一致。但他的结论作的过早，受到奥地利射电天文学家的反驳。仅仅过了几年，到1960年，新的测量导致射电天文学家一致公认射电源的分布跟稳态理论相矛盾。可是，这并没有立即导致该理论的沦落。在20年的时间里，霍伊尔与他的合作者企图避免这个结论，或重新解释数据，或发明跟射电源计数一致的稳态理论的新版本。然而，随着时间的流逝，稳态理论不再被大多数天文学家青睐了。

稳态理论不同于大爆炸理论，不仅表现在提供一个导致不同预言的不同宇宙图景的常规意义上，两个理论在哲学与社会学意义上也有显著的不同。它们代表着宇宙学中的明显不同的“风格”，以及，事实上学科风格也不同。邦迪、哥尔德与霍伊尔以及他们的追随者否认宇宙学是物理学的一个特例。他们强调地面物理学的具有可重复的由定律管辖的特征，而宇宙科学具有不可重复性。由于宇宙概念的唯一性，宇宙被认为不是可说明的，只是一个可描述的科学。此外，对宇宙的理解需要基于那些不能从局域物理学导出的原理。如果它们导致跟已知的知识相矛盾，剑桥的物理学家愿意牺牲自然的定律的绝对有效性。稳态理论内含一种使宇宙学革命化的企图，这个企图以失败告终。稳态理论出自英国，并且仅仅在这个国家稳态理论才找到广泛的支持，并激起认真的讨论，不是偶然的。在某些方面，稳态理论的精神是20世纪30年代英国物理学与天文学很大众化的、我们在第15章描述过的宇宙物理学先前理论的一种延续。

1960年以后的宇宙学

虽然稳态理论家们想象中的革命失败了，宇宙学在60年代



还是真的发生了一种革命。但是，它是一个保守的革命，建立在业已确立的物理学的基礎上，深深扎根于过去。说它是“复兴”比说它是“革命”可能更合适些。它的变化依赖于大量的新发现，它们展示了一些新物体以及一些宇宙学现象的存在。这些发现又一次依赖于诸如射电与微波方法、火箭，以及人造卫星等仪器与技术的快速发展。甚至宇宙学的天体科学也深受惠于军事物理学的仪器与方法的影响。正如 18 世纪 90 年代意外的发现导致微观世界一幅崭新的图像一样，20 世纪 60 年代意外的发现导致宏观宇宙一幅崭新的图像——虽然在后一情形中，完成一个已知的图像多于发现一个全新的图像。

一个新的发现是：天空充满着 X 射线，有的是来源离散的形式，有的是弥漫的背景辐射。这一被美国里卡多·吉阿科尼与他的合作者在 1962 年的发现，成为一个新分支的起点。类星体的发现对天文学是更为重要的。那是加州理工学院天文学家马登·什米德与杰西·格林斯坦 1963 年初作出的。他们发现许多跟通常的恒星与星系不同的形状物体，具有非寻常的光谱、变化着的强度、大量的放射能量和较大的红移。有趣的是，他们在感光底片上观察到类星体，发现后不久给它们起了名字，几年以后才认识到它们是一类崭新的射电物体。这一现象使人回想起物理学史上别的一些关于发现的故事。如 X 射线与正子的发现（第三章与第十三章）。这些情况说明：记录某事物不等于发现某事物。类星体立即成为天文物理学家的时髦而有争议的研究对象。什么物理过程可以说明它们有巨大的能量输出？它们的红移是指示它们是宇宙物体，还是可作别的解释？不久便一致认为类星体确实有很大的宇宙学距离，这意味着它们可能跟稳态理论不符。按照稳态理论，否定这种很远之外与很早之前的物体存在。为了搞清状况，天文学家设计了一种通过类星体的红移对于辐射通密度的依赖关系来进行的检验。1966 年发表的结果跟稳态理论所预言的分

布矛盾。虽有可能说没有矛盾，如霍伊尔所喜欢的，但大多数天文物理学家和物理学家把这作为真正拒斥稳态理论的证据加以接受。

当时，稳态理论已经被甚至更重要的宇宙微波背景辐射的发现所动摇。如前所述，1948年阿尔弗曾预言这种背景辐射温度为5K，但这种预言实际上被忘却了。16年后，普林斯顿物理学家罗伯特·狄克独立地达到了一个类似的结论，并建议他的同事詹姆斯·皮柏斯考虑这个问题。皮柏斯估计假想的背景辐射温度为10K。1965年春，狄克与皮柏斯开始跟实验家合作着手测量辐射。尚未获得结果时，他们就听说贝尔实验室物理学家阿诺·彭齐亚斯与罗伯特·威尔逊所进行的实验。这两名AT&T的物理学家利用一台辐射仪测量来自银河系的信号。在测量过程中，他们觉察到：他们的天线接受到一个3.3K的附加温度，独立于天线的指向。彭齐亚斯与威尔逊不能说明这个附加温度。但狄克与皮柏斯立刻意识到所探测到的实际上就是来自大爆炸的微波背景。在其他波长上这项发现立即得到确认，结果发表在1965年6月的《天文物理期刊》上。这发现有效地削弱了稳态理论的基础，对于准确预言这种辐射的大爆炸理论则给予坚实的支持。对于大多数天文物理学家和物理学家，微波背景的发现是一个实验判决书，事实证明：世界始于一次大爆炸。3K辐射——现在测得的温度是2.735K——仍然被认为是支持大爆炸理论的最有说服力的证据。在1965年的发现之后，人们认识到宇宙背景辐射对于计算氦丰度的重要性。氦丰度问题是不可能由关于星体元素形成的任何理论来解决的。基于大爆炸假说和3K微波背景辐射，1966年皮柏斯发现氦的丰度是27%，跟观察到的估计值绝妙地吻合。这是大爆炸理论的又一个胜利。

彭齐亚斯与威尔逊为他们的发现获得了1978年的诺贝尔奖，尽管他们实际上没有发现辐射——就是说，把它们等同于具有宇宙起源的东西——而是探测到某种他们不能说明的东西。如物理



诺贝尔委员会主席在授奖演说中所说，这次发现把“宇宙学〔转变〕为一门科学，向检验与观察开放”。真正科学的或物理学的（作为数学的对立面）宇宙学只是随着 1963 ~ 1966 年间一系列事件而浮现出来的。这种感觉在 60 年代晚期广为传播。按照这种历史观，1963 年左右以前的事态属于一个前科学的、半虚构的阶段，不是被贫乏的数学、就是被诸如物质的连续创生之类的猜测所辖制。除了这种历史观明显的虚假性外，重要的是注意到：大爆炸理论并非 60 年代的产物，而在伽莫夫和他的合作者的早期工作中就可以发现其充分的发展。

不可否认宇宙学在 20 世纪 60 年代经历了一个额外的沸腾。例如，1962 ~ 1972 年间，关于宇宙学每年的科学论文从 50 篇增加到 250 篇（图 23.1）。可是，对于一门科学的次级学科来说，

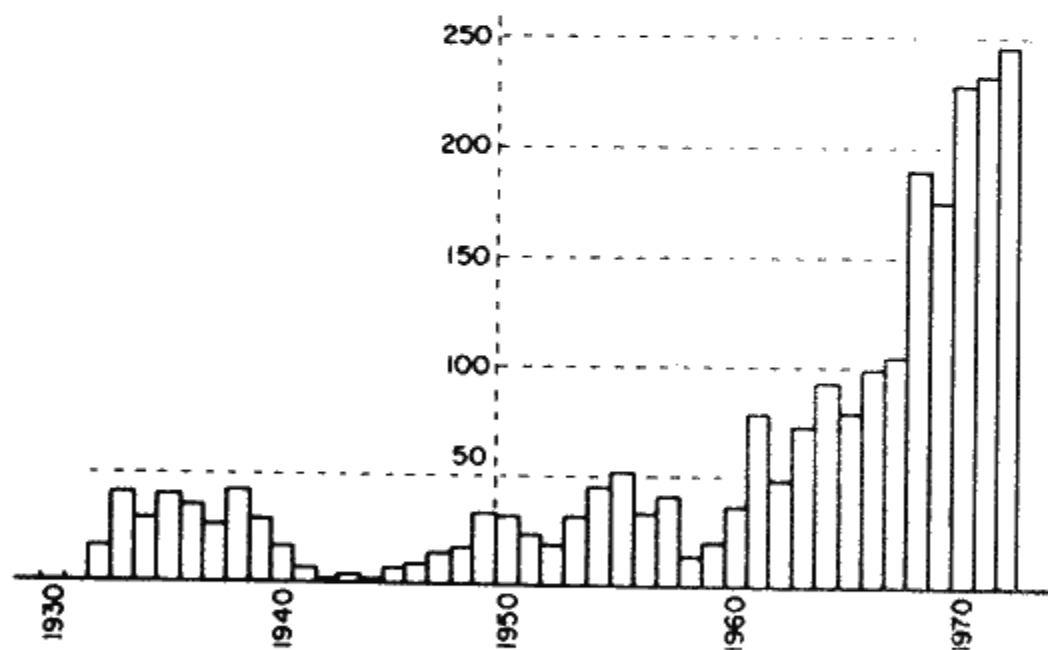


图 23.1 宇宙学的生长，如《物理学文摘》中“宇宙学”与“宇宙进化论”条目下列出的年出版物所示。来源：AIP (1976) 44: 223 ~ 230。

即算一年出版 250 篇论文，那也是一个小数。到 1972 年，《物理文摘》录入的全部出版物中宇宙学不到 0.3% 或宇宙进化论不到 0.3%，这一事实说明宇宙学规模之小。

比出版数量更重要的是：随着稳态理论的销声匿迹，20 世纪 60 年代中期，在宇宙学家中，关于有待解决的问题，以及需要采取的判据，意见完全一致。“热”大爆炸的相对性理论获得了一种规范的地位，其他解释被边缘化。同时，掌握宇宙学知识变成一种社会的常规行为，这一学科成为日益受到教育尊重的全日制学科。在 20 世纪 50 年代，一般是不开这种课程的。从 70 年代起，宇宙学在天文、物理或空间科学等各系科中开出，并有发展之势，而且，学生们是在共享遗产的研究传统氛围中学习它。以早期宇宙学为特征的国家间的区别也消失了。原先，大爆炸理论是美国的理论，稳态理论属于英国，俄罗斯则对宇宙学举棋不定。现在，这领域是国际性的，再也不可能从其拥护的宇宙学家划分出该理论的国籍来。

核物理学与宇宙学之间的合作，始于 20 世纪 40 年代的伽莫夫，70 年代当基本粒子物理学成为新宇宙学的一个重要成分时获得加速的发展。例如，芝加哥大学的嘎里·斯塔格曼、戴维·斯拉姆和詹姆士·嘎恩，经详细计算，证明：如果热大爆炸模型是正确的，那么，中微子的类别数不可能大于 3。这个预言后来被高能加速器实验所确认，从而增加了对于大爆炸模型的基本正确性的信心。粒子物理学对现代宇宙学的最瞩目的贡献是 31 岁的美国物理学家阿兰·嘎斯于 1981 年提出的暴胀理论。（1971 年，俄罗斯物理学家阿列克赛·斯塔罗宾斯基曾提出暴胀理论的另一形式，但他未能吸引别人的注意。）基于“虚空间”的概念，嘎斯设计了一个模型，按照这模型，甚早期宇宙经历极度的过度冷却，并突然膨胀至一个巨大的因子——在 10^{-30} 秒内增大因子 10^{30} 。在初始爆炸之后，膨胀缓慢下来，进而跟标准理论一致。



1982 年理论被俄罗斯的安德列·林德、独立地被美国的安德赖斯·阿尔布雷特与保尔·斯坦哈德所改进。新的暴胀宇宙模型说明了很多事态，例如，宇宙大范围的均匀性、磁单极子的缺席以及空间的近乎平直性。这些都是标准理论所不能说明的。虽暴胀模型仍有问题，但它一直是高度成功的，促进了宇宙学思考的根本性变化。到 1997 年，已发表暴胀理论方面的论文 3000 多篇。在第 27 章中，我们将继续介绍粒子物理学-宇宙学相互关系的更多方面。

广义相对论的复兴

到 20 世纪 20 年代中期，爱因斯坦广义相对论理性地被证实，从而被大多数物理学家所接受。可是，只有少数物理学家作为一个研究主题从事于该理论研究；而大多数人觉得广义相对论在数学上深奥、实验上空虚。虽然狭义相对论常规地应用于原子与粒子物理学，而广义相对论似乎跟实验几乎无联系，显得跟物理学大多数分支无关。1928 年，在狄拉克的狭义相对论量子力学的兴起中，许多物理学家寻求量子力学与广义相对论的统一，但没有一个努力证明是可行的。在广义相对论范围内耕耘的是一小群数学家、理论物理学家和天文学家，他们考察理论的数学结构，或者，从中推导出实验也检验不出来的各种结果。在 30~40 年代，至少跟量子理论与核物理学相比较，它绝不是时髦的理论。该理论起着主要推动作用的唯一领域，就是宇宙学。但是，大多数物理学家认为宇宙学研究位于科学的边缘，如果它是科学的话。

一直所谓的广义相对论的低潮，持续到 50 年代初期。从那时开始，尤其自 1960 年前后，这领域开始被关注，不久便经历了一场瞩目的复兴。一些年轻的理论家群体在诸如美国的约翰·

惠勒、皮特·伯格曼，英国的邦迪和波兰的因费尔德·里奥波尔德及苏联的弗拉季米尔·福克等理论家的周围形成。兴趣更新的一个标记是关于广义相对论及相关领域的一系列会议，第一次会议是1955年的波恩会议，庆祝爱因斯坦理论55周年。接下来是：美国小教堂山会议（1957年）、法国的罗亚芒特会议（1959年）和华沙的一次会议（1962年）。在早期的会议上，处理的是具有理论本性的主题，或者，在少数情形中，涉及天文观察。1970年，在国际广义相对论与引力委员会主办下，一个称为《广义相对论与引力》的期刊出版发行。这个委员会是作为罗亚芒特会议的结果，于1960年建立的。在期刊的第一期中，主编安德瑞·梅斯尔提醒人们注意，“多年来兴起了天文学同GRG（广义相对论与引力）的非同凡响的、极为令人满意的结合。”涉及这种结合，他写道：“GRG肯定把宇宙学从‘过于假说’中拯救了出来，而且，天文物理学与粒子物理学使GRG变得很具体，而在二三十年的时间里，它们一直被如此多的物理学家借口它们是非物理的而受到轻视。”在物理系科中，广义相对论课程在增多，新的教科书被出版。1973年，由查尔斯·米斯纳、基普·索那和惠勒撰写的巨著（1280页）《引力》的出版，是广义相对论已经变化并进入到物理主流之中的又一个标志。

60年代，广义相对论的地位以及对它的兴趣发生如此激烈的变化，存在四个基本原因：第一，广泛地认为抛弃稳态理论是广义相对论的一个胜利；第二，天文学中的新发现激励着把相对论应用于天文学问题中去；第三，爱因斯坦理论受到一个新的、被大量讨论的引力理论的挑战；第四，也是最重要的，新的实验物理方法把广义相对论转变为一门实验室科学。“爱因斯坦的引力理论，他1915年的广义相对论，从一个数学王国搬到了一个物理的王国之中，”美国理论物理学家阿尔弗雷德·施尔德1960年做出结论，“经过40年稀少而贫乏的天文学检验之后，新的地面



实验是可能的，而且正在计划之中。”（Kragh 1966b, 318）

施尔德所指的开拓性实验之一，在 1960 年初被哈佛大学的罗伯特·庞德和格楞·瑞布卡实施，他们测量了“光子的视重”。在 20 世纪 20 年代初，广义相对论的预言曾被天文学测量所证实，但相当不精确，从而不具有决定性。为了测量由地球引力场引起的、在 20 米距离上（哈佛实验楼的高度）频率的位移，庞德与瑞布卡应用了复杂的谱线窄化的新方法，产生一个具有精确频率的 γ 射线。这方法以按德国物理学家鲁道尔夫·穆斯堡尔命名的穆斯堡尔效应为基础。1958 年，它被穆斯堡尔所发现，很快就发现它从核化学到广义相对论，在广泛领域中的用途。这位年轻的发现者因其工作获得了 1961 年的诺贝尔奖。

庞德-瑞布卡实验在 10% 范围内证实了相对论的预言，在 1965 年的一次改进的实验中，其一致性被窄化到 1%。庞德-瑞布卡实验的重要性不仅在于它对爱因斯坦理论的支持，而且，它宣告了实验相对论的一个新领域。70 年代，综合利用原子钟、火箭、人造卫星、计算机以及其他的先进电子学仪器，完全确证了广义相对论。20 世纪末，实验广义相对论已经成为大科学。

广义相对论的理论方面被约翰·惠勒、布拉斯·德韦特和罗杰·彭罗斯和许许多多其他人所研究。1960 年，彭罗斯，英国数学家，在理论中引入新的、威力大的拓扑学工具，于 1965 年证明：一个引力塌缩的恒星不可避免地终止于一个时空奇点。1970 年，彭罗斯、斯蒂文·霍金、罗伯特·格罗赫和其他人的进一步工作得到了一个综合性奇点定理。按照这定理，一个由广义相对论支配的宇宙必然始于一个时空奇点。

60 年代与 70 年代的天文学发现是广义相对论复兴的另一个重要源泉（见表 23.1）。1963 年类星体的发现，以及 4 年后剑桥大学乔斯林·贝尔与安索尼·赫维什的偶然发现脉动星，立即导致试图从理论上理解这两个注目现象的许多努力。结果证明：只

有广义相对论才有可能说明这些现象。跟首先由科纳尔大学托马斯·哥尔德的提议一致，脉动星被说明为急速旋转、有规则性的中子星。由大质量的恒星引力塌缩而成的中子星，曾被奥本海默与哈特兰德·斯尼德于1939年作过理论上的讨论，但在20年以后才被广泛地关注。1967年，惠勒将塌缩成奇点的球形质量定名为“黑洞”。1974年报道说，在X射线源天鹅座X-1中可能发现了一个黑洞。虽一般认为黑洞大量存在，可是，迄今为止，尚未明确证实这些瞩目的宇宙物体。

表 23.1 1962 ~ 1979 年间重要的天文学发现

现象	年份	发现者
X 射线星	1962	布鲁诺·罗西里与里卡多·吉阿科尼（美国）
类星体	1963	马登·什米德与杰西·格林斯坦（美国）
宇宙微波源	1965	哈罗尔德·维弗、S·温瑞布与 A·巴瑞特（美国）
微波背景	1965	阿诺·彭齐亚斯与罗伯特·威尔逊（美国）
红外星	1965	吉里·纽格堡与罗伯特·莱顿（美国）
脉动星	1967	乔斯林·贝尔与安索尼·赫维什（英国）
超亮源	1971	伊尔文·夏皮洛（美国）
双脉动星	1974	约瑟夫·泰勒与拉塞尔·赫尔斯（美国）
引力透镜	1979	丹尼斯·沃尔什（美国）

1974年，天文学还有一个意外的发现，那就是约瑟夫·泰勒与拉塞尔·赫尔斯探测到射电天文信号。他们将之解释为它是由一个双脉动星发射的——就是说，一个脉动星环绕一个不可见的伴星，或许是另一个脉动星运行。泰勒-赫尔斯的发现不仅是一个宇宙学发现：它引起相对论家极大的兴趣，他们意识到双脉动星适合于作为广义相对论的实验物，理论跟观察绝妙地吻合。甚



至更为重要的是，1978年泰勒证明：从双脉动星传来的信息强烈地提示，引力辐射的发射，其速率正如广义相对论所预言。有质量的加速物体发射引力辐射，首先于1916年被爱因斯坦所提示，但在泰勒演示之前，这一提示一直带有猜测性质。1993年，“因为新型脉动星的发现，这发现为研究引力开辟了新的可能性。”泰勒与赫尔斯获得了诺贝尔奖。随便提一下，这是第一个部分地涉及引力物理学的诺贝尔奖项。甚至在泰勒-赫尔斯以前，就有人在实验上寻找引力波了。一系列实验主要是由马里兰大学的约瑟夫·韦伯进行的。韦伯相信：在其有质量的共振棒探测器中的信号指示接受到引力波，并于1969年宣布发现了引力波。可是，他的宣称是有争议的。大多数物理学家认为韦伯并未发现引力辐射。韦伯不同意，继续做他的实验。然而，直到1998年仍没直接观察到引力辐射，这意味着，也没有观察到引力子，引力波的量子说法不能确立。

爱因斯坦广义相对论绝不是在引力的其他形式的理论中没有竞争对手的。这里只提及几个。狄拉克与约丹不成功地发展了引力常数随时间变化的理论，而在1964年，霍伊尔与雅杨特·纳利卡基于粒子间的直接相互作用则提出一个非爱因斯坦理论。对广义相对论最严重的挑战或许是1961年普林斯顿大学卡尔·布朗斯与罗伯特·狄克发展的一个理论。1970年，当人们意识到它导致许多不同于广义相对论的、地面与天文物理学的预言时，布朗斯与罗伯特·狄克理论被热烈地讨论。例如，布朗斯与狄克预言水星进动的位移比广义相对论预言的43"要小。狄克从太阳观察的角度出发，认为被观察的与广义相对论一致的那部分值，是由于太阳比所相信的要扁一些。太阳的扁度问题在10年内继续讨论着。但是，到了20世纪80年代中期，布朗斯-狄克理论跟实验不一致，而广义相对论与实验则一致，于是广义相对论的合理性变得明朗了。

实验室实验、天文物理学观察，以及广义相对论数学基础的进展相结合，产生了一个新的、令人兴奋的子学科——相对论天文物理学。这领域是在第一届得克萨斯的相对论天文物理学专题讨论会上确立的。那次讨论会是相对论理论家与粒子物理学家的罗彻斯特系列对话会议的第一场。首届德州会议的议题是引力塌缩与新的类星体。那是一次真正的交叉学科会议。与会者有核物理学家、宇宙学家和天文学家。弗瑞德·霍伊尔、威廉·福勒、基普·索恩、阿兰·桑德吉、埃德文·沙尔皮特、罗伊·克尔和马登·什米德，全都提交了论文。1963年会议参加者约300人，而1978年第二次会议则有800名物理学家与天文学家参加。在相对论天文物理学专题讨论会与暑假讲习班之后，教科书和进展合订本陆续出版。在新领域中，第一部与最具综合性的书是杰出的前苏联物理学家雅科夫·则尔多维奇和伊格尔·诺维科夫的《相对论天文物理学》（1971年）。对广义相对论与相对论天文物理学兴趣的复兴进一步反映在历史悠久的索尔维会议上。1958年的第8届会议的主题是“天文物理学、引力与宇宙的结构”，包括有霍伊尔、列马特瑞、克莱因、惠勒和其他人的报告。6年后，第13届会议专门讨论“星系的结构与演化”。1973年，第16届会议的主题是“天文学与引力”，会上所讨论的议题包括X射线源、中子星、类星体、脉动星和黑洞。

第二十四章 | 固体物理学初步

1940 年以前的固体

1930 年前后，许多物理学家忙于考察固体的性质。然而，尽管这些研究领域相当活跃——它们许多根植于 18 世纪——当时在社会的、机构的或认识的意义上，却不存在固体物理学的学科。从社会与历史的观点看，固体物理学并不存在。只在第二次世界大战之后，新学科固体物理学，后来重新定名为凝聚态物理学，才开始展翅起飞，并且，还同时吸收了几个当时还不认为自然地属于科学同一领域的专业。《物理文摘》的 1930 年卷（当时仍称为《科学文摘，A 类》），当时未被归入固体物理学或相关词汇的主题索引条目的主要类别有：普通物理学、光学（包括放射性）、热学、声学、电学与磁学，以及化学物理学。这些专业都含有后来人们看来应属于固体研究领域的论文。10 年后，1940 年，《物理文摘》的主题索引中添加一个固体类别，它又分为结构与理论两个范畴。固体理论类又分为：固体，理论：晶体，晶格动力学；和量子理论。从那时起，人们可以说固体物理学是一个分立的学科。从业者正在形成一个科学共同体。

新学科的科学核心，是量子力学在固体物质上的应用，给予新学科以必要的认知相关性的理论结构。在量子力学之前，物理学家（以及化学家、结晶学家和冶金学家）研究固体的力学、光学、磁学、电学和结晶的性质。但这些研究没有共同的理论基础，如果有的话，那只是松散的联系。迟至 1930 年，把大部分化学物理学，包括关于分子光谱与化学反应的讨论，放进致力于凝聚物质的书与论文之中，是司空见惯的。第一批以固体作标题的论文中的一篇是 1937 年撰写的，醒目地出现在《应用物理期刊》上。作者弗雷德里克·塞兹与拉尔夫·约翰逊写道：“直到最近，不同固体的理论明显地缺乏统一性。例如，为了解释铜、金刚石和石盐三种固体的性质，人们必须从它们内部结构的广泛不同的图像开始。”现在情况变化了，以量子理论为基础的统一理论已经具有现实的可能性了。正如作者所写的，“量子理论成功地解释了固体的经典图像所未说明的观察性质。”（Weart 1992, 628）3 年后，塞兹撰写了第一批新固体物理学教科书中的一部，合适地取名为《现代固体理论》。

30 年代，在众多构成原型固体物理学的专业中，金属理论是最重要的一个。德鲁德、里克、洛伦兹以及玻尔的早期理论，全都以自由电子气体模型为其基础，在某些领域中电子气体模型理论给出合理的结果，诸如热导与电导之间的关系，可是，它们并不导出正确的纯金属对于温度的依赖关系。按照经典理论，人们期待金属的比热容比绝缘体的大得多。然而，实验证明情况并非如此。显然，需要新的观念，它不得不再来自于量子力学。

第一个把量子力学应用于金属研究的物理学家是泡利，他在 1926 ~ 1927 年间认识到金属中的电子必须遵从费米-狄拉克统计学。当 1926 年首先由费米——然后由狄拉克独立地——引入这种新的统计学时，应用于物体的应该是这种形式还是它种形式的玻色-爱因斯坦统计学，是很不明朗的。例如，费米与狄拉克原



先都相信气体分子遵从与电子一样的统计学——就是说，它们都是费米子（“费米子”与“玻色子”的名字是1945年由狄拉克引入的）。这个问题因泡利的工作得到澄清。基于不相容原理以及相关的费米-狄拉克统计学，他发展了一个重要的顺磁理论，在许多方面，它成为后来一切金属量子理论的出发点。有讽刺意味的是泡利的工作虽然达到这一结论，可是，泡利对固体理论并没有特别的兴趣。他认为这领域远不如令人兴奋的基本理论“纯粹”。20世纪30年代早期，他有时称固体物理学是“肮脏的物理学”。1931年6月1日在一封给刚算完金属的残余电阻的帕尔斯的信中，他写道：“残余电阻是一种肮脏效应，人们不应该在脏物沼泽中打滚。”反正都一样，泡利在固体理论的早期阶段起着一种重要的作用，似乎同时从事“基本的”与“不洁的”物理学没有什么困难。海森伯、贝特、帕尔斯、布洛赫、莫特、弗伦克尔和朗道，也都如此。他们不是固体物理学家，但都把固体物理学当作量子力学的一个应用领域而有所涉及。

泡利的工作被他的原教授阿诺德·索末菲尔德所效法。他利用费米-狄拉克统计学，给出了一个大为改进了的金属导电理论。索末菲尔德证明：电子气必须是完全简并的，因此，只有电子的很小一部分才对金属的比热容有贡献，这就说明了其相对低的比热。泡利与索末菲尔德的工作开辟了固体物理学的一个新篇章。但它们只是一个开端，他们的工作虽是建立在量子统计学与电子自旋基础上，但他们没有充分利用量子力学机制。虽然索末菲尔德的理论已迈出了令人瞩目的一步，但它与观察的一致性远非理想。然而，不理想的问题激起大量的批评、苛求精细化，从而，形成了一个完整研究项目的核心。例如，1928年《物理杂志》有14篇论文是直接关于索末菲尔德的电子理论的。不久就证明：索末菲尔德理论的主要问题不是它跟实验资料的不一致，而是，它竟如此运作出色。

在接下来的4年里，一个真正的金属量子理论，首先被跟泡利、索末菲与海森伯相关联的青年物理学家发展完善起来了。这一发展的开创阶段发生在慕尼黑、苏黎世与莱比锡。但不久以后，重要的贡献来自英国、法国与前苏联以及美国。到20世纪20年代末，量子力学的数学与概念结构整体已完成。物理学生们纷纷被劝告把理论应用于各个新领域。其中，固体看来是特别有希望的。一个学生费里克斯·布洛赫，他在莱比锡海森伯手下工作。1928年，作为其博士论文的一部分，布洛赫开始对晶格中电子波函数作量子力学研究。诸如“布洛赫定理”与“布洛赫态”等重要概念均出自这一工作。动用归因于洪德、伦敦与海特勒关于新量子化学的概念，布洛赫考察了不仅单个原子或分子，而是在构成一个晶体的许多原子的叠加电场中的电子的行为。他假设电子紧密地束缚于晶格中的势，从而证明：能态不是分立的，而是连续的允许能带。布洛赫的工作，以及，几乎同时的帕尔斯与贝特的工作，奠定了能带理论的基础，或许是固体理论的最重要部分。他们从早期能带理论得出结论：高导电性不只是一个关于电子高活动性的问题。电子需要在能带中找到自由态；如果这样的态不存在，那么，晶体将是一个绝缘体。沿着这一思路，布洛赫首次成功地说明了金属与绝缘体之间的区别。

1929年，在海森伯的提议下，帕尔斯考察了反常或“正”霍尔效应，在这种效应中，某种金属中的电流被磁场所影响，俨如载流子是带正电荷。因这工作的关系，他注意到能带边缘的电子以特殊的方式运行，即它好像是带正电荷的。这正如帕尔斯所说的“空穴”就是以这样的概念为基础的，那就是：一个几乎充满的导带顶部附近存在着空位——或者，缺乏电子。1931年，海森伯证明：这种空穴的行为俨如一个正电荷的电子具有一个正有效质量。（帕尔斯与海森伯的固体空穴跟狄拉克在同一时期引入的反电子空穴有许多相似之处，但两个概念是独立的。）另一个重



要的固体概念是巴黎物理学家里昂·布里渊引入的。他在1930年把帕尔斯的思想发展成一种几何技术，从那时起，就一直称为布里渊带。他后来回忆，“开始时我并未意识到我在做一件可能变得真的重要的事。我做它只是好玩，纯粹的好奇心按我的考察思路走。”（Hoddeson, Baym, and Eckert 1992, 119）。能带理论进一步被阿兰·威尔逊发展。他是剑桥物理学家，来莱比锡跟海森伯与布洛赫一道工作，部分是觉得剑桥物理学过于关注原子核。1931年，威尔逊发表了他关于半导体的开拓性论文，在其中他首次说明半导体是一个有能带间隙的绝缘体。电子处于激发时才能跨过能隙。威尔逊模型使固体计算走向更实际的、因而是走向理论与实验更加统一的平台。整个30年代持续着这种趋势，其中包含把能带理论应用于钠与其他实际金属的重要因素。1933年，首先做出这一应用的，是维格纳和他在普林斯顿新建的高等研究所（创建于1932年）的学生弗雷德里克·塞兹。维格纳-塞兹的计算进一步被麻省理工学院的约翰·斯拉特和他的学生们所发展。

金属的量子力学电子理论的早期阶段于1933年完成，当时，贝特在《物理手册》中对整个领域做了一个综评。近300页长的论文虽然作者署名为索末菲尔德与贝特，但全文几乎全是贝特写的。《手册》其他文章涵盖“晶体的动力学晶格理论”与“晶体的结构灵敏性质”，指示着固体物理学正在形成一个不同的科学分科。这新的学科在德国诞生，接着快速地扩展到其他国家。在美国，第一批固体物理中心是：麻省理工学院斯拉特的物理系和普林斯顿大学的一个中心，维格纳在那里讲课并指导塞兹与约翰·巴丁。固体定向的新建研究所中最成功者，或许是布里斯托大学。在30年代以前，它还不是一个重要的物理学中心。1930年，科学与工业研究部（DSIR）支持该校一个理论固体物理学的项目，这一措施象征着：对理论固体物理学，来自政府与工业界

的支持比大学的要多。

1930年，尼维尔·莫特，一位原来对固体物理学没有什么建树的核物理学家，成为布里斯托的一名教授。虽然他自称对金属物理学的无知是“源远流长的”，却正是他很快地把物理系转变成为一个固体研究的世界中心。莫特回忆说，他“着迷地得知量子力学可以被应用于具有如此实际重要性的金属合金的问题之中。跟任何别的事物一样，这就是把我们的兴趣转向固体中的电子问题的原因”。（Eckert and Schubert 1990, 91）在布里斯托，跟别的地方一样，固体物理学的实际重要性被给予优先地位，是为了获得经济上的支持。然而莫特与他的同事们关注的是学术物理学而不是工程物理学。1936年由莫特与他的同事哈里·约尼斯合著的《关于金属与合金性质的理论》，利用了适应于真实金属的许多定量的量子计算，同时自由地并入了带有各种近似方法的许多经验考虑。虽然，按照泡利的价值尺度，它是“肮脏的物理学”，可是，它却成了新一代金属物理学家的标准读本。布里斯托团队跟美国的同事，不仅双方的学术界，而且双方的商学界，关系密切。在英国，这个团队跟国家物理实验室，以及私人工业家合作。在第二次世界大战之后，工业与固体物理学家之间的密切关系变得高度重要了。即令在战前，这种联系在诸如英国、德国、荷兰，更不用说美国等国家中，已很好地确立了。

半导体与固体物理学共同体的崛起

有些物质既不是典型的金属，又不是典型的非金属。这种半导体，或是化学元素，或是化合物，自19世纪就为人知晓了。早在1833年，迈克·法拉第观察到：硫化银的电阻随温度的增加而减少，跟金属的行为不一样。后来在该世纪，在硒中发现了光电流，并且，1874年，德国物理学家费尔迪纳德·布朗观察到



有些金属的接触有整流效应。“半导体”一词似乎在 1911 年就已确定。30 年代，当威尔逊的能带理论被越来越多的固体物理学家所发展时，这些半导体以及其他半导体的性质都得到合理的说明。半导体被认为是在价带与导带之间有一个狭窄的禁带的绝缘体。与此同时，半导体在实验上不仅仅只在哥廷根被研究，罗伯特·泊尔还在那里开办了一所实力雄厚的实验固体物理学学校。到 30 年代末，人们知道：整流性质是一种接触效应，发生在金属与半导体的界面上；人们还知道：半导体有两种类型，p-型与 n-型。这些现在熟悉的名字是 1941 年由贝尔实验室的杰克·斯卡夫引入的，借以取代原先所用的匮乏型与盈余型的名字。在 p-型或盈余型半导体中，大多数载流子是负的；而在 n-型或匮乏型半导体中，大多数载流子是正的。虽然，关于两种接合类型（金属连接于 p-或 n-型半导体）的整流有许多理论，可是，找到一种满意的说明却很难。1940 年前后，主要由德国的沃尔特·肖特基、英国的莫特和俄罗斯的达维多夫发展了极令人满意的整流接触理论。半导体物理学是那时期物理学的一个很小的部分。1933 年这方面主题发表的论文约 60 篇，而在随后的几年里，论文数目稳步下滑。1940 年达到低谷，只有 20 篇。

战争引起半导体研究的快速增加，部分与用纯硅与纯锗制造至关重要的雷达探测器有关。就是在跟战争相关的工作过程中，美国考察了第一个 p-n 结，证明是绝好的整流子。1938 年达维多夫曾提示过这种整流子，但他的提议在当时没有引起关注。在半导体研究史上，最重要的一个事件，无疑是 1947 年末晶体管的发现。把半导体与一个真空二极管的类比扩展到包含一个三极管的结构中去，是人们所知晓的。而且，一个运作的固体三极管甚至战前在哥廷根已被泊尔和鲁多尔夫·希尔什试制成功。1938 年，为了应付电子技术公司 AEG（通用电力公司）了解情况，这两位物理学家进行了用晶体控制电流的实验，把电流放大了 100

多倍。可是，那只是实践而已，既未获得专利又未进一步发展。虽然泊尔跟工业界有很好的联系，但他没有兴趣把他的工作转变成取得专利的技术发明。

厄恩斯特·布朗，固体物理学家与科学史学家，十分贴切地总结了半导体物理学的发展：“半导体物理学的历史不是著述皇皇的历史，而是一部脑汁绞尽的历史；没有高贵灵感横溢的天才的冲刺，却有巨大的创造性以及希望与失败之间的浮沉交替；没有扫荡式的推广，却有坚持与顽固之间的仔细考量。因此，在一般的固体物理学的以及特殊的半导体物理学的历史中，多的是数以千计的聪慧想法和高超实验技艺的无名英雄，少的是伟人以及他们的业绩，因而是组织化而不是个体化的时代的一种反映。”（Braun 1992, 474）然而，尽管半导体物理学一般非浪漫的发展，这个领域仍不乏伟大的人，也不乏光辉的事迹。半导体的发明可以称得上是一个伟大的业绩。

晶体管是贝尔实验室的婴儿。1945年，贝尔实验室制定了固体物理学的一个研究项目，其中包含一项由威廉·肖克利领导的半导体物理学。肖克利是麻省理工学院的物理学家，从1936年起就为AT&T工作。除了别的事，肖克利和贝尔实验师沃尔特·布拉登的长期目标是做一个可以使用的固体放大器，作为电话系统的一个开关。可是，那不是个发展项目，而且，肖克利、布拉登与他们的同事初始的目的只是扩展关于硅与锗性质的知识。开始，他们失败了。但是，1947年约翰·巴丁，他早两年来到贝尔实验室，理论上分析了实验所涉及的问题。巴丁得出的结论是：半导体表面上的态必须考虑，因为电子可能陷落在表面上。原先表面能态理论是针对固体自由表面提出的，不是对于半导体的。按照巴丁说法，“新颖的特点不是表面态的概念……而是运用这概念理解半导体的实际表面。”（Braun 1992, 468）经过进一步探索，一个实验突破接着理论的突破而至。1947年12月23日



巴丁与布拉登在第一个点接触晶体管处观察到晶体管效应，点接触晶体管是在锗基上由两个电极所组成。“晶体管”一词是“传输阻挡器”的缩写。经过半年的保密期，固体放大器，或作为发明名称的晶体三极管，在一次新闻发布会上亮相，1948年7月1日《纽约时报》作了一般性的报道。可是，虽说它是一个基础性的发明，但点接触晶体管寿命不长，刚生产出来就过时了。它很快就被一个根据肖克利1948年发展的理论制造的p-n结三极管所取代。《物理评论》因其缺乏理论基础拒绝发表。1956年，就是因为这项工作，肖克利跟巴丁与布拉登一道因“其对半导体的考察以及他们发现晶体管效应”获得了诺贝尔奖。也就是这一工作，被纳入其1950的著作《半导体中的电子与空穴》，形成了现代固体电子理论的基础。

著名的晶体管发明是50年代导致半导体物理学以及一般的固体物理学繁荣昌盛的诸多事件之一。半导体出版物描绘了这种爆炸式的增长：1945~1955年间，每年的论文数从20篇上升到几乎400篇。50年代是固体物理学真正成为一门独立的科学学科以及形成一个独立的新一代物理学家的社会共同体的10年。一个科学专业发展成为一个科学共同体的标志，通常包括教科书、研究生课程、委派的教席、学术会议、专业学会以及专业期刊。这些标志的一部分在战前就有了，但大多数是50年代才有的。在战争期间，美国物理学会关于建立新的分会问题讨论多次。那样的分会是应用物理学家特别向往的，他们觉得在现有的组织中，他们的研究领域没有被充分代表，或者，不被重视。1944年提出了关于建立固体，或者如原来取名的金属物理学分会的建议。这个分会最终于1947年被通过。从那时起，人们可以把“固体物理学家”说成是科学家了，它不只是从事于一个特殊研究的领域，而且属于一个有别于物理学其他共同体的科学共同体。花了8年的时光，新的学科才获得动力，原因之一是它必须

跟核物理学科竞争。当时的核物理学正以极高的速度与活力发展着。事实上，在一个短的时间内，核与粒子物理学似乎垄断着物理学。该领域不仅被联邦政府与私人慷慨赞助，而且，在智力与认知上拥有“英雄”科学的声誉，无别的学科可与之匹敌。但是，固体物理学在传统上因其跟工业靠近、跟自然的基础领域较远而被视为某种价值较次的专业。在某些物理学家的眼中，它仍然是“肮脏物理学”的一个领域。麻省理工学院的斯特莱回忆说，在某种程度上，“我们系常被那些人轻视，他们认为除了核与高能物理学家，在别的领域中就没有想象力了。”（Weart 1992, 656）

然而，新的固体物理学共同体证明是具有高度竞争力的，即使跟更具魅力的核物理学相比。在一个长的时期内，固体物理学没有自己的期刊，实际上也无必要有。因为，不断扩展的《物理评论》是一个发表大部分最有价值的固体论文的平台。到1964年，这期刊的出版分两部分：一部分主要是处理固体；另一部分特别处理核与粒子物理学。1970年，它分成独立的两卷：致力于固体的《物理评论 B》的篇幅比核与粒子的《物理评论 A》要大。就科学人员而言，1951年，固体物理学有350名美国博士物理学家，约为美国博士物理学家总数的十分之一，少于美国博士核物理学家的一半。10年后，状态实质地改变了，不是核物理学家变少了，而是因为固体物理学爆炸性增长。美国博士固体物理学家已经有了2 000人，几乎跟核物理学家一样多。粗略估计，当年美国固体物理学的总预算是1亿美元的量级。

1950 ~ 1968年间，固体物理学的发展增长示于图24.1中。注意：增长率比“原子、分子、粒子”类（包括核物理学）要高。到1965年，固体物理学论文数超过了粒子类。增长的一个重要因素是半导体工业，以及发现固体物理学有用的其他工业的崛起。在作为一个整体的美国物理学中，在工业中与在高等教育



中受雇的物理学家比例是 1:2；而固体物理学家这个比例的倒数 2:1。从经济支持的结构可进一步说明固体物理学对于工业的依附性。虽然高能物理学吸引了联邦政府最大量的支持，固体物理学则是工业资金的最大受益者（表 24.1）。这里给出的数字来自美国物理学会，那是美国最大的国家级共同体，也只有那里才可

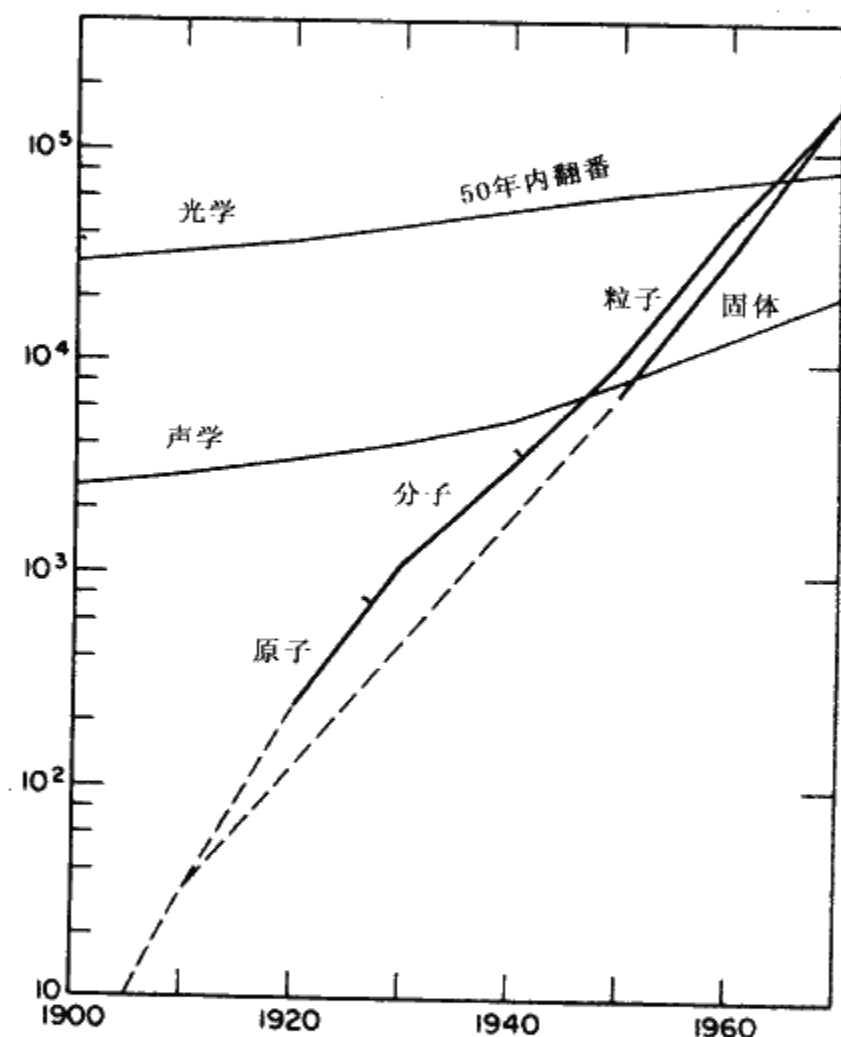


图 24.1 固体物理学与物理学几个其他子领域的论文总累计数。来源：Menard 1971.

表 24.1 1970 年美国最大的 4 个基本物理学领域

领域	联邦政府	工业	合计	百分比
高能	150	—	150	27
固体	56	80	136	24
等离子体与流体	77	10	87	16
核物理	73	2	75	13

注：计数单位是百万美元。

得到这些资料。其他国家的情况没有实质的不同。根据对于 1961 年固体物理学出版物的一项研究，美国和前苏联各占总论文的 $1/4$ ，英国与日本共占另一个 $1/4$ ，法国与德国一起约占 $1/10$ 。以下就是较小份额的国家了，包括意大利、荷兰、瑞士和丹麦。

超导性的突破

如第 6 章所提到的，在 20 年代，超导性完全是一个谜团。1928 年，布洛赫的金属理论给理解现象带来了新的希望。许多理论物理学家开始把固体的新思想应用到超导性的研究之中。从事这种努力的物理学家的名字简直可以形成一本给人印象深刻的、精英物理学家花名册。玻尔、海森伯、布洛赫、朗道、布里渊、弗伦克尔、克朗尼希、贝特、卡什米尔和泡利，都是热情投入到努力洪流之中的显赫人物。可是，他们的聪慧想法一个个地失败了。1931 年前后，布洛赫精心研究超导性（但从未发表他的工作），后来回忆说，“我的负面结果使我扫兴极了，以致我看不到前进的路。在相当长的时间里，我只是犹豫地满足于看到别人不自觉地老是掉进相同的陷阱之中。这把我带到一个滑稽的陈述，一切关于超导性的理论都是可反驳的。后来被引申为极端的‘布洛赫定理’：超导性是不可能的。”（Gavroglu and Goudaroulis



1989, 77)

在某种程度上，理论家的失败被实验家取得的进展做了补偿。最重要的是1933年迈斯纳效应的发现。沃尔瑟·迈斯纳与罗伯特·奥奇森菲尔德两名柏林帝国物理技术研究所的物理学家发现：当固体锡或铅的圆柱体在均匀磁场中被冷却到转变温度以下时，磁力线突然被排出金属。超导体的抗磁性完全出乎意料，这就向理论家提出了另一个有待说明的现象，并把它纳入到他们的模型之中。迈斯纳效应为超导性的第一个满意理论提供重要的动力。这理论就是弗里兹·伦敦与海因兹·伦敦兄弟1935年发展的宏观理论，他们当时是流亡英国的难民物理学家。理论描述了超导体中电阻消失以及抗磁特征的电磁学方程。伦敦兄弟把抗磁性视为超导金属的一种内禀性质。尽管有此成功，人们意识到伦敦-伦敦理论不是对超导性的最终解答，因为理论是唯象的，没有以微观基础说明现象。

1945年以后超导性理论工作进行得更为生气勃勃。现在不仅有了来自固体物理论，而且还有来自量子场论的更精细的理论工具。对新时期的贡献者包括像朗道、波恩、海森伯和费曼一样的名流，但是，问题似乎跟战前一样地难于解决。费曼跟布洛赫一样着迷于超导性，同样因不能解决问题而苦恼。在他逝世前不久，他回忆道，“花了可怕的时间试图理解超导性，竭尽所能地做每件事……我形成了一种抵制超导性问题的情绪障碍，以至当我听到关于BCS〔巴丁-库珀-施里弗〕的文章时，我很久都没法让自己去读它。”（Mehra 1994, 430）

迈出微观理论重要第一步的，是一个不太出名的人。在纳粹统治期间侨居英国的德国物理学赫尔伯特·弗勒里什，1950年提出超导性可能是量子化的晶格振荡（称为声子）引起的电子间的相互作用所致。基于这一思想，并利用量子场论的方法，他发展了一种理论，将临界温度随超导体原子质量增加而减小的结论含

蓄地包含其中。早期测量温度对质量的依赖关系的努力给出负面的结果。直到 1950 年才有理由相信同位旋效应，当这效应于 1950 年发现时。弗勒里什于是意识到他的理论包含着预言临界温度反比于原子质量的平方根而变化。该年后来进行的实验证实了 $M^{-1/2}$ 的变化规律，这些实验自然被当作对于弗勒里什理论的强有力的支持。然而，它虽是一个注目的进展，理论却仍不被接受，因为它不能说明迈斯纳效应以及别的一些事。鉴于弗勒里什只考虑电子-声子相互作用，1955 年，巴丁与戴维·潘尼斯还考虑两个电子之间的直接排斥，证明：即令在这些更现实的条件下，仍存在低能引力。

真正的突破是 1957 年来到的，这突破就是把电子声子相互作用跟如下洞见结合起来，这洞见是：由于晶格媒介的电子之间的吸引作用，金属中自旋相反的一对电子形成束缚的玻色子对。这种“库珀对”早在 1946 年就被里昂·库珀在化学境况中提出，但直到 1956 年里昂·库珀才对这概念被给出一个理论上的证明。此外，他建议这些对子不应作为分立的实体而应集体地被处置。第二年，库珀跟他的伊利诺伊大学同事约翰·巴丁和约翰·施里弗一道，把电子对假说发展成一个详尽的、超导性的微观理论。三人理论后来称为“BCS 理论”，把超导态实质上归结于电子凝聚于具有公共动量、被单一相干波函数代表的库珀对。巴丁-库珀-施里弗理论说明了已知为超导性的一切实验事实，并作出了大量新颖的、很快被证实的预言。因此，BCS 理论对于长期探索的为什么有些金属是超导体的问题给出了正确的回答，如果不是最终的话。如巴丁所回忆的，“如果有差异，那么，重新检查一次，通常就会发现计算中错了某个地方。迄今为止，超导体的一切迷惑特征就像拼版玩具一样，拼合得天衣无缝。”(Bardeen 19973, 35) 1972 年，三位美国物理学家获诺贝尔奖，以承认他们的理论突破——巴丁是第二次，是迄今为止唯一获两



次物理奖项的人。另一个诺贝尔奖尾随 BCS 理论而至。那就是英国物理学家布里安·约瑟夫森 22 岁时预言半导体量子态应该能够从两个超导金属之间的势中漏过去。这个 1962 年预言的约瑟夫森效应很快被实验证实，并被用于高级测量技术之中。

BCS 理论不仅是固体量子理论的一个胜利，而且，它充实了非相对论量子力学的普适有效性。到 20 世纪 50 年代中期，超导体的微观理论已经寻觅了 1/4 个世纪，没有成功的一个合理猜测是量子力学本身结构可能有某种毛病。在 1954 年费曼给朗道的一封信中，他提到：除了引力，超导性是唯一仍拒不接受量子力学说明的现象。3 年后，清单的问题由 2 个变成了 1 个。当然，BCS 理论的成功并不意味着超导性的理论工作已经完结；相反，它极大地激励着超导性以及理论物理学其他领域的新工作。超导性理论利用了其他领域的进展，特别是量子场论，贯穿其大部分历史。理论的转移被这样的事实变得容易，即：几个对超导性感兴趣的科学家，来自或对其有严格训练的量子场论与基本粒子物理学。例如，弗勒里什与库珀都是这些领域的专家，这些领域明显不同于其低温下的凝聚物质。

超导性，特别在 BCS 理论之后，吸引了发现它对于考察超导理论跟量子场的更一般理论有价值的物理学家们。例如，约奇罗·纳姆布曾系统地探索了两种理论的相似性，并把量子电动力学的方法应用到超导性之中。BCS 理论不是规范不变的，有些理论家发现这是它的一个缺陷，因此，企图表述一个不失理论预言功能的、规范不变的版本。1967 年纳姆布证明：缺乏规范不变性不是缺陷，而是反映了超导性的本性，即规范相关的能隙。纳姆布不仅对利用量子场论探索超导性有兴趣，而且，他意识到：两种理论之间存在着严格的数学相似性，从而超导理论中的方法可用来解决量子场论中的问题（见第二十二章）。

BCS 理论的地位没有明显受到 1957 年以后的精细与推广的影

响。到 70 年代，超导体的研究领域似乎本可以大体完成的——至少就涉及理论而言，因为实验忙于延伸经验知识并寻找新的具有更高临界温度 (T_c) 的超导体。这类工作跟理论没太多关系，更多的是做更系统的实验，以探明究竟。约翰·哈尔姆与伯恩德·马赛厄斯，一个英国人，一个瑞士人，都在美国工作，考察过度金属化合物与类似物质的低温性质。新一类超导体 (II 型) 具有比通常超导体大得多的临界磁场。1953 年，哈尔姆与马赛厄斯发现材料 (V_3Si 与 Nb_3Sn) 的 T_c 约为 18K，对原先由德国物理学家 1941 年记录的 15K 稍有改进。随后用其他方法的实验达到 23K 的记录，这是 1973 年用铌锆化合物达到的温度。

20 世纪 80 年代中期以前，高温超导尚不成熟，因而实际应用超导技术的可能突破的前景显得暗淡。直到 (美国) 国际商用机器公司的苏黎世实验室研究人员乔治·柏德诺兹与阿列克斯·缪勒集中研究一类金属氧化 (陶瓷的) 矿物的性能时，局势才发生逆转。1986 年，德国 (柏德诺兹) 与瑞士 (缪勒) 物理学家发现一个 Ba-La-Cu-O 系列有 35K 的 T_c 。这项发现掀起了世界范围低温实验室的工作热 (图 24. 2)。它也对理论家提出了挑战，因为 BCS 理论不能说明新一类超导性。由休斯敦朱宗武领导的小组和他原来的学生、在阿拉玛的吴昂昆考察了 Y-Ba-Cu-O 材料，1987 年，报道该材料在液氮中是超导的。朱为此申请了专利，所宣称的温度 $T_c = 90K$ 不久被证实。在高温超导研究中，

开始了一个爆炸式的发展。美国物理学会的 1987 年 3 月会议达第一个高峰，4 000 名物理学家出席了这个喧哗的会议，人们称之为欢呼新超导陶瓷的“物理学摇滚音乐会”。到 1987 年，《物理评论通讯》收到关于高温超导的提交稿 300 多篇。第二年，一个日本小组在高压条件下用陶瓷 Tl-Ca-Ba-Cu-O 达到 $T_c = 125K$ 。到 1995 年 Hg-Ba-Ca-Cu-O 创约为 $T_c = 164K$ 的记录。斯德哥尔摩的诺贝尔委员会承认柏德诺兹-缪勒发现的意义，于 1987 年 11 月授

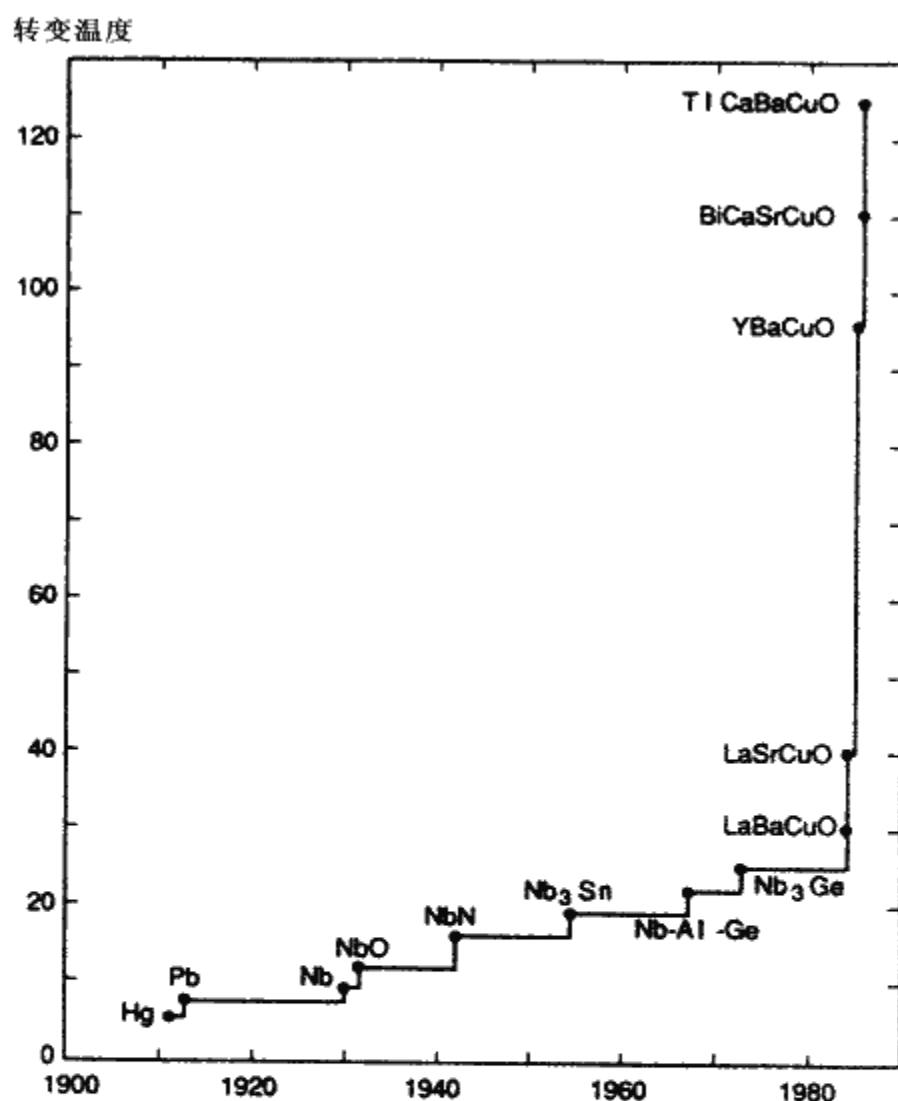


图 24.2 最高临界温度及发现的年份。来源：P. F. Dahl, *Superconductivity: Its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides* (1992).

予他们奖项。这是诺贝尔授奖历史上，最快的一个。

导致高温超导热情高涨的一个重要原因，是这项发现有可能发展成为有商业市场的技术。早在1987年7月超导商业应用联邦委员会在华盛顿特区召集会议时，科学新闻界就为新领域的诞生

大造声势，包括每周 7 篇快讯报道最新进展。日本的科学家与企业家在超导商业化的竞赛中特别活跃，投入了认为赢得竞赛所必要的资源。政府与私人工业建立了国际超导中心（ISTEC），目的是发展以高温超导为基础的商业实用技术。ISTEC 是面向世界公司的国际财团，但事实上，几乎所有成员公司都是日本公司。完全入股一个公司第一年必须交纳 80 万美元，以后每年交 11 万美元。这样，ISTEC 保证在 1988 年有初始基金 3 500 万美元，以后每年 500 万美元。日本公司觉得这种投资是正当的，他们曾预言到 2000 年超导体完成 300 亿的年市场。这预言是过于乐观了。跟聚变研究情形一样，从科学发现通向技术发明的道路证明是困难重重的，而且，是预料不到的。

从晶体管开始

按照 1951 年一份关于美国物理学会成员材料简介，42% 的成员从事于现代物理学，其定义为量子理论、核物理学、电子学，以及原子与分子物理学；只有 27% 的成员从事经典理论、声学 and 光学等“旧物理学”。最吃香的领域证明是电子学，18% 的成员具有领先领域专业认证资格。其次是核科学，占 15%。对于当时仍为真空管的电子学的迷恋是一股风；而当固体设备取代真空管时，又刮起另一股风。1949 年，贝尔实验室的点接触的锗晶体管是固体物理学的一个胜利，但它不是一个大的商业成就（见第二十四章），不仅它难于发展成为工业产品——西部电器 1951 年开始生产它——而且，晶体管价格昂贵，同时，跟与之竞争的真空管比较起来，难于操作。例如，它们有噪音、不太可靠，以及对湿度和机械干扰敏感等缺点，而且。同一系列的两个晶体管性能都不一样。所以，在布拉登与巴丁发明了 3 年后，晶体管就无声无息地没有实际应用了。

使用结晶体管取代点接触晶体管是个可能解决办法。但在—

段时间内，肖克利的思想停留在理论上。如两个历史学家所说的，“肖克利可以在任何可想象的位形中运用这些结设计出任何数量的放大器来，但他的方案大多是心灵的自慰，直到结的组装工艺最终赶上了他的爆炸发明为止。”（Riordan and Hoddeson 1997, 177）实践问题最终得到了解决，1950年，结晶体管成为一项发明。很快，肖克利写了一篇 $p-n$ 结的理论说明，先发表在《贝尔系统技术期刊》上，后来与他的合作者戈顿·蒂尔与摩根·斯帕克斯在《物理评论》上给出一个说明。开始，这发明未被关注。只在后来，肖克利与他在贝尔实验室的合作者做了进一步的改进，1951年提供了第一个实用的微瓦结晶体管才被关注。同年，通用电器公司使用它们自己型号的结晶体管跟着做了。新的低功率低噪音的装置证明比点接触晶体管优越，从而成为晶体管工业的真正出发点。

然而，不论哪个型号，第一代晶体管是太昂贵了，很少有机会打入市场。对开拓晶体管的厂家幸运的是，有一个顾主不论价格，愿意支持晶体管的发展。战争期间，电子学对于美国武装力量，特别对海军与空军，变得越来越重要。军事官员认识到在雷达、导航设施以及导弹系统亟需小型化的电子线路。为此，他们渴望促进晶体设备的发展，不管代价有多高。军方以两种方式这样做：一是购买大量的晶体管，二是投资晶体电子学的研究与开发。1952年生产的9万个晶体管几乎全部是武装单位购买的。估计在1952~1964年间，美国军方为此花了5 000万美元。早期晶体管工业严重地依赖于军事，没有军方的支持，它的发展要慢得多。有军方的钱就可能发展新生产方法，以降低其成本，最终使其在民间市场上有竞争力，包括作为科学仪器的元件也有竞争力。迟至1967年，美国花在电子管上的钱比花在晶体管与其他半导体设备上的钱多。但从那以后，晶体管工业爆发性发展，而电子管工业则萎缩了（图25.1）。

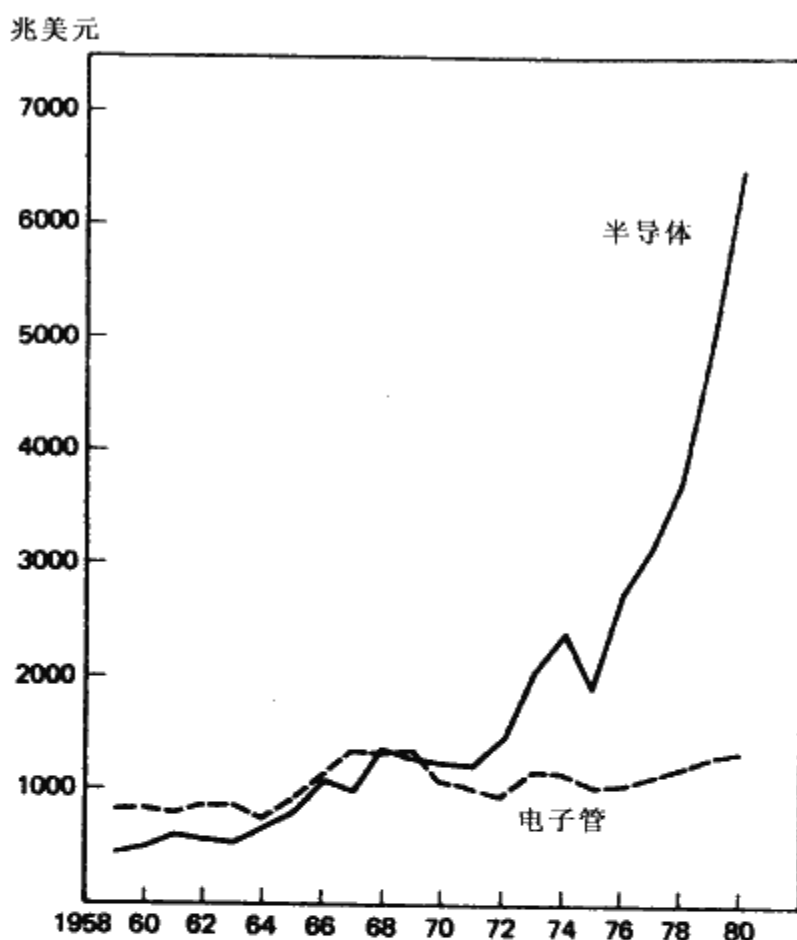


图 25.1 1959 ~ 1980 年间，美国花在电子管与半导体设备上的经费。来源：W. A. Atherton, *From Compass to Computer: A History of Electrical and Electronic Engineering* (1984).

早期晶体管用锗作半导体。它的第二个重要发展步骤就是转移到硅上来。这一步是得克萨斯仪器公司首先迈出的。它是一家小公司，原先生产石油勘探用的地质学仪器，1952 年跨入了新生的晶体管工业。第一个成功开发 p-n 结硅晶体管的是贝尔实验室物理学家戈顿·蒂尔，1953 年前往得克萨斯仪器公司前曾跟肖克利合作。别无他人，肖克利是微电子学时代之父，他于 1954 年离开贝尔实验室，在加利福尼亚的帕罗-奥尔托创办了肖克利半导体实验室，在那里开创了著名的硅谷时代。

虽然肖克利的公司商业上不成功，却具有间接的重要性，因为它是被原先的几个合伙人创办起来的小公司的源头。“叛逆者”（肖克利这样称呼他们）之一是罗伯特·诺伊斯，他跟一家仪器公司费恰尔德组建了一家半导体公司。在费恰尔德半导体公司的科学家引进了硅晶体管一些新的生产流程，导致了1957年更新的更有效能的“台式晶体管”问世。在这装置中，晶体管的功能用一种所谓的星型技术被限制于一片薄氧化表面层上。这方法适合于把许多硅或锗晶体管的集成电路做在一个单一的半导体块上——就是说，无须使用导线。集成半导体电路的想法原是空中楼阁，1959年，诺伊斯把它变成了一项专利。他不知道，同一年更早一点另一个类似的专利已经新近被得克萨斯仪器公司雇佣的杰克·基尔比所登记。基尔比的第一个集成的“块”电路包含了3个电阻、1个电容和建在1个锗片上的晶体管。被诺伊斯与基尔比独立开发的集成电路，开启了微电子学历史的一个新篇章。这新篇章的发展与较早的晶体管篇章之间存在惊人的相似：得克萨斯仪器公司的第一批集成电路贵得不得了，几乎全部被军方收购，收购大户是空军。1962年一个集成电路片价格为50美元，军方在这方面共花了100亿美元，其中92亿美元花在重要防御上。1968年，一个集成电路片的平均价只有2.3美元，销往军方的产品不到一半。

60年代期间，集成电路技术被得克萨斯、费恰尔德以及其他几家小公司大大地发展了。早在1945年，肖克利就想出了场效应晶体管，那是一个其流经薄半导体层的电流被一个外电场调控的晶体管。可是，花了15年的时间，贝尔实验室才成功地发展成为金属-氧化-硅（或MOS）晶体管型、实际的场效应晶体管。由于MOS晶体管可以更紧密地迭放，且需更低的功率，所以这种形式的晶体管证明是最适合于集成电路的。到60年代中期，集



成电路进入民用市场，不久发展成微处理器，用于计算机与别的地方。1963 年美国电子工业生产了 2.52 亿美元价值的晶体管。当然，37% 被工业，主要是计算机所用，16% 为一般消费品。

始于晶体管的固体物理学的整个的发展，对现代世界极具重要意义。在其 1950 年论半导体的教科书中，肖克利简要地猜测了晶体电子学的未来。他的猜测比他所认为的更接近于现实：“那些精深地致力于这领域的人与作者共享他们对于最终潜在性抱有的乐观情感。对于广大工作者来说，似乎一个可与整个真空与气体放电电子学领域相比较的领域已经被开辟。”60 年代所发生的向集成电路转移的变化，不如说是从电子管向分离晶体管的转移来得精准。集成电路不涉及新的物理学，跟晶体管相对照，它是被工程师与工业科学家而不是被研究物理学家发展的。诺伊斯与基尔比几乎不是诺贝尔奖的认真候选人。谈到集成电路，基尔比注意到：“跟晶体管的发明相对照，它是一项科学含量较低的发明。……它对科学思想的贡献很少。”集成电路早期开发中的另一个参加者多格拉斯·瓦绍尔提示：在 1960 年前后，“工程师与技术员基本上不再聆听基础科学家了，实际上，对于基础科学家在干什么不太感兴趣。”（Braun and MacDonald 1978, 103 and 138）然而，虽然半导体物理学只是遥远地相关于纯物理学的发展，基尔比宣称集成电路“对科学思想的贡献很少”，却是不正确的。间接地，对微电子学的发明，对实验科学许多分支更新完善的电子仪器，以及对于科学的推进具有巨大的重要性的高能物理的任何现代实验，天文学的任何现代观察，以及现代实验凝聚物质物理学的任何重要工作，由基尔比与其他人发明的集成电路技术的作用都是绝对不可小视的。

微波，激光和量子光学

激光，战后物理学最重要的与多功能的科学仪器之一，是微波器或微波放大器的直接后裔，而微波器本身是战时雷达科学与技术婴儿。虽然气体微波谱在 1940 年以前就被创造，但到了 1940 年，雷达工作以及丰富的雷达赢余设备全然改变了这个专业，把它变成了一个复杂而急剧发展的领域。按照历史学家的评价，“由气体的微波吸收而产生的分子光谱，无疑地，是被雷达所创造——在一切意义上——的物理学研究的一个繁荣领域的首要例子。”（Forman 1995，422）微波不仅物理学家对它有重要兴趣，而且美国军事对它的兴趣也不逊色，他们想知道如何建造一个毫米波源。对于已有的电子设备来说，这不是一个轻松的任务。像磁控管与速调管之类的设备，不适于达到这个波长域。

1939 年从加州理工学院毕业后，查尔斯·汤斯在贝尔实验室呆了 8 年，在那里他从事雷达与导航装置的工作。1948 年他加入哥伦比亚大学辐射实验室。这个实验室主要被军事单位（美国信号部队与海军研究办公室 ONR）赞助。他们意在让磁控管产生很短的波长；1951 年，汤斯创下了不到 1 毫米的最低波长的记录。可是，毫米磁控管证明对于实际目的来说基本上是无用的。它们效率不高，很昂贵，寿命很少超过 2 小时。1951 年春，作为 ONR 的一名咨询员、它的微波代咨询委员会主席，汤斯想起了一个以完全不同的方法产生微波的念头。汤斯的想法是：利用自然的分子与原子自振子，并利用分子束的受激辐射作为强放大的毫米波波源。一个类似的设计被约瑟夫·韦伯提出，可是，他不知道如何把他的方案变成一个实际的设备（我们在第 23 章中遇到过这同一个韦伯，他宣称探测到引力波）。汤斯发明的科学基础，受激辐射的概念，追溯到 1917 年的爱因斯坦辐射理论，但是，在



50年代以前，那是一个没有受到很大关注的概念。

在1950年的一个重要的实验中，爱德华·佩塞尔与罗伯特·庞德演示了受激辐射以及粒子数反转——就是说，在非平衡条件下，有处于一个高能态的分子的数目多于处于较低能态分子的情况。为了把分子从低能态带到高能态去，它们可以光学地被“泵浦”，就是说吸收入射光子而被激发。光学泵浦方法原先被法国物理学家阿尔夫瑞德·卡斯特勒于1950年提出。2年后被他在巴黎的小组用实验证实。受激辐射、粒子数反转以及光学泵浦是微波器的关键要素。但在1951年以前，它们单独存在，在物理学中不起大作用。至关重要的是这样一个想法，即：利用一个共振腔以产生正反馈，从而获得能量的正增益。这是汤斯原先描述为“自持的〔分子〕链反应”的一个过程。1951年，微波器的主要要素都知道了，但在汤斯以前，没有人怀着将微波放大的目的把它们组合起来。微波器的概念迟滞发展的一个重要原因，也许是它需要把物理学家的知识跟工程师的知识结合起来。汤斯回顾说：“必要的量子力学观念一般不为电器工程师所知晓，而物理学家……常常不熟悉电器工程师的贴切想法。这个领域的真正发展在第二次世界大战之后不久才开始，是可以理解的，因为这场战争把许多物理学家带到量子力学与电器工程之间的广阔地带。”（Bromberg 1991, 222）

1951年5月，汤斯的新思想是微波器概念，或者，如他在实验室记录本的标题所称的“从被激发的分子或原子中获得短微波的仪器”。取代分子被动地响应一个电子束的激励，汤斯想象出共振分子的概念，它既产生微波又靠自己携带能量与频率。在哥伦比亚辐射实验室的其他物理学家对汤斯的方案没有信心，认为以切仑科夫辐射为基础的另一种产生微波的方法更有前途。可是，汤斯死盯住他关于分子振子的思想，并于1954年春，从氨分子探测到振动的方式，获得了第一次成功。利用他跟詹姆斯·

戈顿与赫尔伯特·扎格一道制造的 1.25 厘米放大器，汤斯可以演示这第一个“maser”，它是受激辐射放大的微波首写字母的缩写。或者，如在《物理评论》中第一次被引入的，“一个实验装置，可用作高分辨率的微波谱仪，一个微波放大器，或者，一个非常稳定的振荡器。”微波器的名字是在 1955 年一篇更综合性文章中引入的，其标题是《微波器——新型微波放大器，频率稳定的摄谱仪》。当时，一个改进了的氨束激光已准备就绪，汤斯的专利申请、哥伦比亚大学关于微波器（或“原子钟”）的发表允许，以及汤斯给陆军通信部队的报告也都准备就绪。在这个按汤斯 1951 年思想制造出来的第一个微波器中，氨分子是通过一个电子过滤系统（一个“聚焦器”）发出的，在其中处于激发态的分子与处于低能态的分子相分离。然后，激发态的分子束进入一个空腔内，在那里他们创立一个振荡的电磁场，作为输出的微波被发射出来。只在用他们的第一个微波器进行实验之后，汤斯与他的合作者才认识到它最可贵的特性之一就是它是绝无噪音的。此外，由引入辐射进入空腔所得到的放大，原先并不认为是微波器这个概念的实质部分。开始时，汤斯并不关注什么或许是微波器与激光器最具特征性的特点，即波的相干性。当然，一个科学家做了一项光辉的发明却对于所做的没有一个清晰的理解，那不是第一次了。

汤斯的氨微波器，基于两个能态之间的粒子数反转模式，很快竞相产生许多新型的微波器以及获得粒子数反转的新方法。1955 年莫斯科的列别捷夫物理研究所的尼可拉·巴索夫与亚历山大·普罗克霍罗夫提出一个泵浦方案允许连续的粒子数反转，产生连续的放大。这方案利用了二能级原子的量子传输，其中中间能级是亚稳态（即有一个长寿命）。第二年，在哈佛大学工作的一名荷兰-美国物理学家尼古拉斯·布洛姆伯根详尽地分析了一个类似的方案。布洛姆伯根的工作对微波与激光物理学以及一般的



量子电子学具有持续的影响力，因为它把磁弛豫与核磁共振（NMR）中的概念带进这些领域。基于布洛姆伯根的三能级理论的第一个顺磁微波器于1958年出现。成功的红宝石微波器由密立根大学切希罗·基库奇与他的合作者开创，由于其低噪音温度，无线电望远镜和微波天线在固体微波器发现的早期即开始应用。例如，彭齐亚斯与威尔逊在其著名宇宙微波背景辐射的1965年发现中，就利用了红宝石微波放大器。可是，这些应用是例外。跟它的后辈激光相比，微波器在商业上从未变得很重要。

1955年以后，把微波器原理应用于可见或红外区之中的想法应运而生。原先以为会很难，可能需要一个大得可怕的输入功率。汤斯再一次在军方的鼓动下——这次是空军科学研究办公室——着手处理这个问题。1957年他从理论上考察了它，达到这样的结论：把微波器技术应用于可见或红外区，或许不会有严重的问题。他跟贝尔实验室的阿瑟·肖洛参了军，并且，两位物理学家于1958年在《物理评论》上发表了对于“红外与光学微波器”的详细分析文章，结论是“在红外与光学区产生振荡的微波器，前景看好”。在当时，AT&T登记了一项专利申请。汤斯与肖洛的论文是激光的理论基础，但在当时，它还只是一个理论。

在接下来的两年里，大学与公司研究室的几名物理学家与工程师竞相开发可操作的激光器。其中之一是在私人公司TRG（技术研究小组）工作的戈顿·哥尔德。1957年，他独立地揣测如何制造出一个激光器。哥尔德还首次采用“laser（激光）”这个词，作为“由辐射的受激发射所致的光放大器”首写字母的缩写。在那个由于发射了人造地球卫星世界为之震惊之后的时期里，大多数的研究是被军事机构慷慨支持的。其中一个机构是高级研究项目办事处（ARPA），它有兴趣于把激光作为一种武器来开发。1959年，花了近100万美元，把TRG纳入一个旨在将其发展成有功能的激光器的秘密项目。利用不同的方法与进路，贝尔实验

室与国际通用机器公司瓦特逊中心的科学家也在努力建造一个实际的激光器。在哈格赫斯研究室的一名物理学家铁奥多·梅曼也这样做，他专注于固体激光器，而不是其他小组所考察的气体激光器。梅曼使用铬离子制成小部分红宝石晶体，并发现了一种通过来自氙闪光灯的光脉冲来激发离子以获得粒子数反转的方法。实验证实了他的计算，1960年5月16日，他得到了他的第一个激光器。稍后不久，梅曼制作了一个工作中的激光器，向《物理评论》迅速提交了一篇论《红宝石中光学的微波作用》的文章。可是，编辑退了稿，可能由于论文不符合期刊只登“对基本物理学有一定贡献的文章”的要求。因此，激光器的问世之作——一篇标题为《红宝石中受激的光辐射》——出现在英国刊物《自然》上。1961年，梅曼和他的合作者向《物理评论》提交了关于他们实验的详细说明。这次，论文采纳了。开始时，对梅曼是否真的获得了一次红宝石激光器作用有所怀疑，搁了一段时间才承认他发明了激光器。

1960~1961年间，几个科学家小组开发了其他类型的激光器。1960年末，阿里·捷凡与他在贝尔实验室的小组制作了一个气体放电激光器，利用的是氦原子撞击氖原子使其激发的机制。这是一个重要的发明，因为它是一个连续工作的激光器。捷凡的首次氦氖激光器在 1.15×10^{-6} 米的红外波长下运作。在激光历史上另一个重要结果是：1962年构造了一个砷化镓晶体激光器，这是快速发展的半导体激光器系列的首例。经过几年之后，激光研究才成为物理学的热门领域，但到了60年代中期，新领域进入一个急速发展状态。1964年编纂的文献目录含激光600条，包括概观和其他非研究文献。2年后，最新的条目有3390项，涉及3335名作者。大多数早期报道激光研究的论文在《物理评论》或新的《应用物理学快讯》上发表。由于这个领域发芽萌蕾，越来越多的论文在诸如《光学通讯与应用光学》和《激光聚焦》上



发表。

激光受到工业和学术双方物理学家的青睐与研究。60年代早期，列入《科学文摘》的美国激光论文，约有70%是由工业实验室提交的。其中80%的激光研究论文部分受到DOD的支持。这不奇怪，美国大部分激光研究是军方赞助的，不论是大学还是工业。估计1963年DOD在激光研究的开支约2 000万美元。激光的重要性不仅因其在科学上用作仪器，它在军事和民用技术上有许多用途，它还是60年代出现的光学复兴的一大因素。光学停滞了20年，1950年左右被广泛地认为是一个具有伟大过去但没有伟大未来的呆板学科（与图24.1比较）。跟全息、半导体的光学应用以及非线性光学的崛起一道，激光在光学科学中创造了一个崭新而有活力的发展。

跟微波器不一样，激光在商业市场上也获得了扫荡似的成功。在这方面，它的足迹跟晶体管的相似。1993年，估计年市场额有200亿美元，而且，其中3/4是民用的。激光的商业应用是广泛的，不仅包括外科与医药、印刷与光通讯，而且包括集成光盘、金属焊接、卡片阅读和娱乐；此外，激光在多功能科学仪器中起重要作用。在许多激光类型中生产最多、功能最强的是半导体激光器。1988年，此类的激光器生产了约2亿个。

微波与激光器的开发主要是在美国进行的，但俄罗斯物理学家，以及1960年以后日本与欧洲物理学家也有重要贡献。在莫斯科列别捷夫研究所，巴索夫与普罗霍罗夫独立于汤斯认识到氦激光器的可能性，提出了3种方法，于1958年提出将半导体应用于激光。汤斯、巴索夫与普罗霍罗夫因他们的贡献被授予了1964年的诺贝尔奖。1981年，其他两名激光技术的开拓者布洛姆柏根与肖洛也同样受誉。激光的发明者梅曼则无缘领受诺贝尔奖的荣誉。

光纤

第一个广延的通讯系统，18 世纪 90 年代的克劳德·查皮的光电报，是以光信号为基础的。但继后许多远程通讯的发明——从电报到无线电报——利用了电磁波谱的广泛不同部分，并通过金属或大气传输信号。虽然利用玻璃管储存与传输信号的思想在 30 年代就被考虑，只在战后才开始做光纤的实验。50 年代早期一项研究被一组跟德尔夫技术大学有联系的科学家进行。他们的项目是由荷兰国防研究协会赞助的——军事支持物理学研究不仅仅在美国。为了确保全反射，德尔夫的科学家开发了一种覆盖一薄层低折射率物质的玻璃与塑料纤维。可是，纤维对军事与商业都没有用途，所以飞利浦公司拒绝购买与发展该技术。

包裹纤维的第一次实际应用，不是在通讯中，而是在医疗中，就是在 1957 年发明的柔性胃镜上。当时认识到：为了光纤在更长的距离上运作，必须克服两个关键问题：第一，需要一个相干的、强聚焦的光源；第二，用现有玻璃纤维作实际的波导管，其信号损失大得可怕。由于激光的发明，第一个问题似乎可望解决。鉴于气体激光器不实际，在早期就寄希望于半导体激光器，因为它既紧凑又便于利用输入电流进行调制。用于光纤实验的第一个激光源是砷化镓激光器，并发现了各种固体电光二极管可作接收器使用。1970 年由贝尔实验室开发的半导体二极管激光器发现作为光通讯源甚至更有用。AT&T 的另一项发明光发射二极管也可用。虽然在光纤系统的发展中，晶体管起不了直接作用，但它作为半导体激光和光电二极管的一个源，却起着一种间接的作用。

激光对光通讯大送秋波，可在当时，光通讯是一直不被工程与工业科学家看重的领域。由于光源问题原则上解决了，兴趣就



集中在传播媒质上。关键问题是能否设计出由玻璃或其他透明材料组成的细小光纤，其光学衰减度大大小于当时所知道的最好的玻璃。当时工业还没有准备好应付为生产适合于光通讯的极高性能的光纤所需要的科学与技术开发工作。整个问题被两名为斯坦福远程通讯的伦敦实验室工作的查尔斯·考与乔治·霍克哈姆所彻底考察。在一篇发表于《电气工程师协会的进展》的论文中，两位物理学家计算和讨论了在圆形截面纤维波导管中各种损失模式。这一精湛工作是以经典电磁学理论为基础的，实质上就是在圆矩形玻璃纤维给定的边界条件下求解麦克斯韦方程。这是一次本会被世纪之交的劳德·瑞利与其他电磁波动理论的专家们所理解和赞赏的工作——实际上，早在1910年，彼特·德拜与他的学生D·霍德罗斯就对介质圆柱体中电磁波的传播进行了第一次完全的理论分析。

考与霍克哈姆预言：在光纤中信号损失的临界值是每1千米20分贝（dB/km）或更少。相当于纤维中传播的1%。可资利用的玻璃纤维的损耗约1000 dB/km。因此，考与霍克哈姆的计算表明需要改进两个数量级（记住：dB/km是对数单位）。这是一个坏消息，但考与霍克哈姆仍然得出结论：开发这样低损耗的纤维是“困难但不是不可能的。理论与实验研究表明：一个裹于覆盖结构中的玻璃纤维……具有套状直径约 100λ [100倍波长]代表着一种具有新型通讯媒质重要潜能的、可能的实际波导”。他们写道：“一个成功纤维波导的实现，在目前，依赖于合适低损耗电解质材料的可用性。”（Bray 1995, 271）考与霍克哈姆的工作是对玻璃工业的挑战，它激励着世界各地的私人与政府的实验室接受这个挑战。贝尔实验室、国家远程通讯实验室以及私人工业的有关单位，都认真地投入到试图寻找适合于纤维光学的材料努力之中。美国的康林玻璃厂，世界最大、最有研究取向的玻璃公司，建立了一个寻求答案的研究小组，由罗伯特·毛瑞尔领

导。他是麻省理工学院毕业的博士物理学家，1952 年以应用物理学家身份加入康林公司。康林团队集中于熔融硅。为了提高折射率，在其中添加了氧化物。康林的新纤维不仅具有优良的电磁性能，而且，机械性能强与化学稳定。有趣的是，这项革新是受到晶体管工业关于纯硅与混合硅的工作的启发。经过 4 年的折腾，1970 年第一批混合硅纤维准备就绪。衰减因子为 16 dB/km ，他们由此看到了希望，认为开发出实用的光纤维只是时间问题。在接下来的几年里，康林发展了新兴玻璃纤维的许多组装方法，并生产了更有效的型号。1975 年，毛瑞尔与他的团队达到了 4 dB/km ，1980 年又降到 0.3 dB/km 。在同一时期，日本的研究者报道一衰减度的新纪录 0.2 dB/km ，十分接近混合硅纤维的理论极限值。70 年代末，纤维光通讯从创造转入革新。第一条光纤缆道投入运行。新技术最重要的应用之一是海底缆道。第一条是 1986 年跨英国与比利时之间海峡的海底缆道。2 年后，第一条跨越大西洋的光纤缆道，称为 TAT8，为英国和北美洲服务。这项由美国 AT&T、英国电讯公司和法国电讯公司合作完成的改革工程，有 4 万个电话的容量，几乎是已有的跨越大西洋的原有电话容量的两倍。在 80 年代与 90 年代，纤维光学继续急速发展。最重要的发明之一是 1987 年的一种放大光纤信号的方法，那就是在线路上插入一个掺杂有稀土元素铒离子的纤维。跟纤维激光的发展一道，掺杂铒的放大器是开创光纤通讯的新篇章。

科学受到攻击——物理学处在危机中

危机的信号

大约从 1965 年起，美国物理学以及在某种程度上欧洲物理学也一起进入了一个麻烦的水域。从曼哈顿工程伊始的年代，物理学一直处于发展、乐观、政治支持和从不间断的公众友善支持的史无前例的鼎盛时期。60 年代末，越南战争在美国变成一个有高度争议的问题，学术界的反战情绪变得比较可以接受和普遍了。由于绝大部分物理学家从事于军事项目或者被军费赞助，他们变得跟当时处于水深火热之中的军事-工业综合体等同起来。大约在相同时间，核能开始失其部分天真与魅力。人们第一次询问核电站是否真的是通向廉价能量的毋庸置疑的、直到当时仍被认为是理所当然的道路。专家们能保证反应堆是安全的吗？怎样防止独裁者利用核能技术生产原子弹？对于核能技术的早期担忧容易外推到对跟技术关系最密切的科学家、物理学家的担忧。一个最重要的结果是福特总统 1974 年决定取消原子能委员会，1977 年用一个新的能源部 (DOE) 来替代它。“原子”一词的消失，主要具象征意义。越南战争以及对于环境问题增长着的关注，只是

政治文化以及重新定向该时期动摇西方世界的情感的综合体中的两个比较重要的因素。

在传统文化价值受到攻击的同一时期，政府与科学之间的关系也变化了。政治家与管理人员开始对什么对科学好、什么对社会好的准则置疑。对于科学更世俗的态度跟许多物理学家关注的美国基金系统的改变，遥相呼应。1969年曼斯菲尔德修正案禁止国防部把钱用在跟军事目的无直接关系的项目上。虽然国家科学基金(NSF)接受了一笔额外开支8 500万美元，那也不能完全补偿军事机构减少支持所造成的损失。此外，NSF经费增加的因素之一是增强有益于社会的研究项目的关注，其中包括社会科学而不是基础科学。1970年，美国物理研究所主任威廉·科奇评论说，物理学“从一个被视为对国家的生存与尊严不可或缺的一门科学”变为被置于“一个更世俗的、有新的优先权的社会范畴之中”。(Schweber 1994b, 143)

在20年的时间里，一般认为明智的选择是：在基础科学方面的投资要大大地归还给工业方面，以保证经济的增长。现在，有些领头的经济学家拒绝把科学作为创新因素而必须支持的理性原则。按照一位经济学教授哈里·约翰逊的观点，一个国家在科学上花的钱跟这个国家的经济增长之间没有清晰的关联。1968年他辩护说，基础科学“纯粹是，且只不过是，一种奢侈的、只在那社会极小有特权的人才可接近的好事，他们拥有鉴赏其怪异神秘性的教育，并且，他们一直致力于规劝足够数量的公民追随并支持他们的行动。”(Kragh 1980b, 39)这是适合于大部分物理学共同体的一种说法，这也是一个论据，如果被接受，那么就会导致政府对于基础物理研究支持的明显削减。这样，物理学家感到外界对他们要钱的合理合法性的置疑的压力在不断增长。单凭诉求科学好奇的内部准则，或者，如施温格所作的假设，再也不够了。施温格说：“任何时期的科学水平是对待物质基本性质的流



行态度的集中表现，物理学家的世界观确立了技术以及社会文化的风格，并且，指明未来前进的方向。”（Schweber 1997，664）

按 1983 年美元折算，联邦政府对物理学的支持由 1967 年的 10.45 亿美元减少到 1976 年的 6.9 亿美元——减少 34%。随后支持力度缓慢回升，但到 1983 年仍只为 1967 年水平的 85%。在同一时期，DOD 与 NASA 对基础科学的经费急剧地减少，与 NSF 经费的缓慢增加实在不成比例（见表 26.1）。由于支持的减少，进入物理学家共同体的新人也减少了。在 70 年代初，在美国各大学授予 1 600 多名物理学博士头衔。10 年后，减少到不足 900 名。最大的二级学科，固体物理学，博士生人数从 1971 年的 442 人降到 1980 年的 202 人；基本粒子物理学，第二大二级学科，从 278 人降到 117 人。只有光学是增长的，从 25 人增到 43 人。无疑，正是由于“激光效应”以及光学在工业上的重要性在增长（图 26.1）。人才市场一般是不好的，新的博士物理学家找不到工作的比例相当可观，或者，不得不从事跟他们所受教育无关的工作。跟 30 年代早期一样，工作危机是有限的，而且，只持续相对短的时间。到 1980 年，“好日子”就大部分回来了，或者，看来

表 26.1 美国对物理学基本研究的投入，以 1983 年百万美元价值折算
单位：百万美元

来源	1967	1976	1984
NSF	94.8	126.4	151.6
AEC/DOE	519.8	379.5	563.9
NASA	216.8	107.0	101.6
DOD	179.6	60.4	126.1
合计	1045.2	690.2	960.4

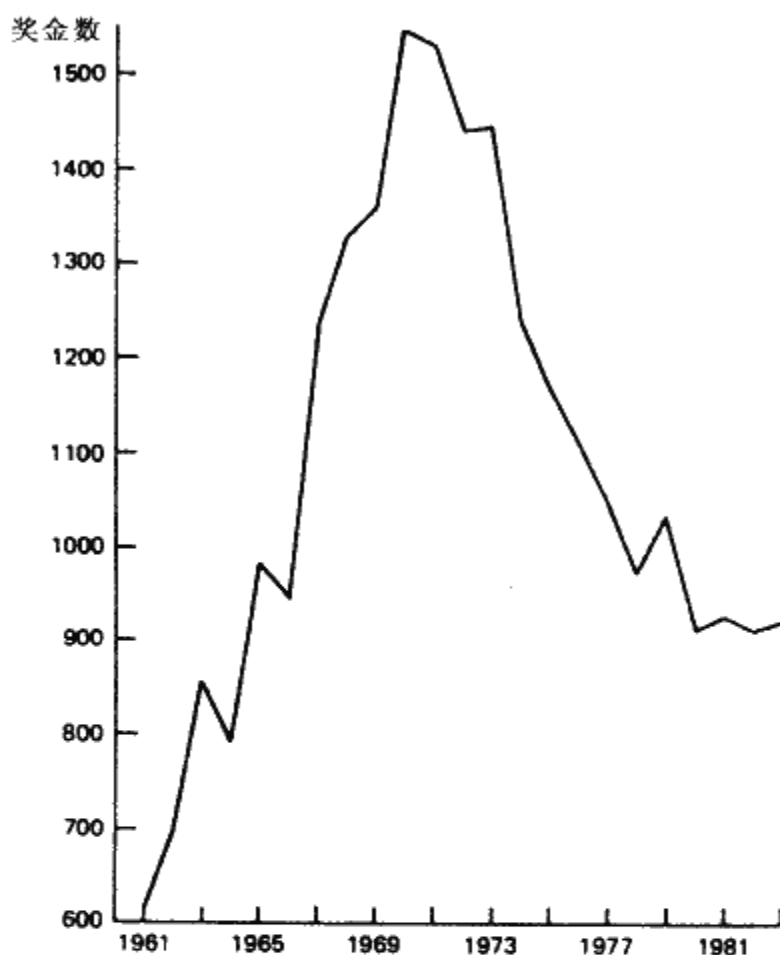


图 26.1 1961 ~ 1983 年间，美国的物理学博士学位人数示意曲线。

来源：Physics Through the 1990s; Elementary-Particle Physics.

如此。然而，物理毕业生人数继续停留在一个低水平，而且，外国侨民，欧洲人或亚洲人在毕业生中占很大百分比。应注意：美国物理学只在相对意义上经历了一次“危机”，即相对于前 20 年有过的极端的支持和好运而言。此外，这次危机涉及的是外界因素，并不严重影响科学知识的进展。事实上，这个在高能物理学共同体内谈论危机最多的时期，恰好是高能物理学做出如此瞩目进展以致人们开始谈论“新物理学”



的时期。

70年代美国物理学的危机不仅仅与经济支持和充实新物理学的方式有关，也跟一般的“理性”危机相关联。在某种程度上，它们是后一种危机的结果。虽然物理学家一直习惯于被视为国家的英雄，物理学被视为科学之王，从60年代后期开始，公众对科学的信心急剧下降。1971年民意测验发现只有37%的民众觉得科学家“讨人喜欢”。《新的教士》是核物理学家拉尔夫·拉普撰写的一本书的书名，他强烈地关注物理学的社会学与伦理学的现状和发展。物理学家自身常常大声地发出不同的声音。有的还对事务的现有次序提出质疑。公众针对这一现象主要议题之一是物理学家作为一个群体卷入到社会事务之中，社会问题不是物理学却被物理学家作为施展他们影响的合法领域。具体地，在军事研究、军备竞赛以及越南战争中，美国物理学家的立场是什么，作用如何？这些问题不是新问题，但在1970年左右问得更加频繁且更加坚定。

1968年贝克莱物理学家查尔斯·施瓦兹提议：美国物理学会（APS）应该卷入到公众事务之中，称就物理学谈物理学是错误的。按施瓦兹的观点，应该对越南问题具体表明立场。“不仅因为在这事务中有所谓影响力，还因为跟美国社会结构其他部分享有共同的关切与责任。”（今日物理1968年1月9日）施瓦兹的提议在APS会员中激起了热烈的讨论。许多人支持，要求APS采取立场。当然，其他人担心APS会变成一种政治工具。如一个受雇于一家军事实验室的物理学家说的，“我们不想让学会沦为像‘嬉皮士’、‘激进分子’那样在外界影响下行事的人群。”（今日物理1968年2月15日）施瓦兹的提议被坚实的多数所否定，并不意味着美国物理学家是不关心社会问题的。他们一般地是支持政府的越南政策的，或者，是乐于为五角大楼服务的。关于以更人情与社会公正的方式利用与组织科学的问题，存

在一种实在而广泛的关注。例如，1969 年建立了为社会与政治行动的科学家组织，旨在寻求“现代科学与技术的一种根本的重新定位”。其组织秘书是斯坦福大学 42 岁的物理学家马丁·佩尔，他后来因其在中微子的工作获诺贝尔奖。抗议卷入越战的物理学家的百分比比任何其他学科的都高，包括社会学家与人类学家。许多调查指示：2/3 大师级的物理学家支持激进的学生的行动主义，4/5 不赞成大学实验室的传统研究。反对立场不限于越战，还包括军备竞赛，以及特别反对新提出的反弹道导弹（ABM）系统。在 1969 年春的 APS 集会上，1 000 名物理学家签名请求尼克松停止 ABM 系统，痛惜“正当我们国内膨胀着的危机要求国家资源真正定位时，开始了一场特别危险的、最终无果的一轮武器升级”。（Easiea 1973, 311）

20 世纪 70 年代对物理学支持的下降以及许多物理学家的社会新觉醒在美国表现最明显，但也不限于美国。几乎所有欧洲国家，政府都在开始平衡整体科学的预算，而在预算内，物理学受到的打击相对沉重，虽不如美国厉害。在这 10 年，基金与公众的兴趣一般而普遍地从物理学转向生物学与社会科学。然而，说欧洲物理学经历了一次“危机”，很难说是正确的说法，尽管基金锐减和其他问题，它的发展是稳定和公平健康的。当然，除了有不同欧洲国家中的物理学，实际上不存在“欧洲物理学”这样的分类。或许，欧洲物理学的最大问题不得不说是不同国家的破碎性。70 年代前后，困难的经济状况使英国与法国削减他们用于高能物理的研究与开发（R&D）的经费。在英国有几家大的物理设施关闭，只有西德对物理学的支持有适度的增加。这个国家也是这一时期对 CERN 及对其国家高能实验室支持的唯一国家。

走向一个更统一的欧洲物理学系统的重要一步，是 1968 年建立欧洲物理学会（EPS），意大利人吉尔伯托·伯纳狄尼任第一任主席。这个学会是在意大利物理学会的 1965 年会议上决定建



立的，当时的与会者同意物理学家增加对于社会、政治与价值问题的介入，以加强欧洲物理学家的统一。EPS 基本上是一个原有各个国家物理学会与科学院的一个统一的或保护性的组织。1972 年它包含 24 个国家的组织，其中 8 个来自共产主义欧洲，15 个来自非共产主义欧洲；作为唯一的非欧国家，以色列也是一个成员。EPS 的成员组织代表 36 000 名会员，使 EPS 成为世界上最大的物理学家专业组织。

传统上，每个较大的欧洲国家都有其多少具国际性的物理期刊。这些期刊常常有其伟大的过去，但在美国主宰的战后，是否还会有伟大的未来就说不定了。完全归属于 EPS 的第一个期刊，在这意义上的第一个真正的欧洲物理期刊，是《欧洲物理快讯》，创刊于 1986 年。它是意大利《新实验》与法国《物理期刊》两刊的快讯部分合并而成。虽然新期刊接受英语、法语、德语和俄语的稿件，但发行伊始，所有的论文都是用英语写成的。很久以来，英语被承认是物理学的国际语言，用其他语言的国家期刊在前沿物理学研究中实际不起作用。到 1980 年，不能说与不能写英语的大师级物理学家是稀少的。1986 年以后，其他欧洲物理期刊，合并、倒闭，或在 EPS 出版系统中被重新组织。欧洲物理期刊太多、太滥了，必须做合理化的改革。1988 年，改革风潮达到高峰，当时，德国的《物理杂志》与法国的《物理期刊》合并变成新的《欧洲物理学期刊》，效法《物理评论》，新期刊分 5 个部分出版。它不仅有印刷版还有电子版。

到 1983 年，美国物理学危机——如果它真的是一场危机——终结了。联邦政府的支持开始显示一种实质的增长。最戏剧性的变化是分配给国防部的钱。里根总统 1984 年的预算要求联邦的 R&D 增加 69 亿美元，几乎全部的增加都跟国防部相关。1980 年，R&D 中联邦基金的国防份额是 48%，而 1984 年预算是 67%。80 年代所发生的是科学的重新军事化。赋予科学以那种使

人回想起 50 年代的作用——就是说，充当新武器技术与其他相关军事知识的供应者（见图 20.1）。军事研究作用复兴的主要原因是里根的主动战略防御（SDI，或“星球大战”），一个技术上庞大的 260 亿美元的研究项目，旨在发展一个以先进的激光与粒子束武器摧毁攻击俄罗斯弹道导弹为基础的“核保护伞”。这项动议在物理学共同体中引发了一场热烈的讨论，在许多方面，是原先关于 ABM 系统与越战辩论的一次重演。虽然许多物理实验室是因 SDI 项目而被赞助的，美国大多数物理学家对它没有多少热情。在里根宣布之后一年里科学家联合会征集了 1000 名科学家，包括 54 名诺贝尔奖得主，支持反对 SDI。他们辩护说：SDI 不仅技术上是天真的，经济上是毁灭的，而且，“伦理上是可恶的”。关于物理学在军事项目上的作用问题，跟早期的辩论一样，物理学家意见不一致。一名抗议 SDI 的诺贝尔奖得主是罗伯特·威尔逊，1965 年他发现了宇宙背景辐射。他的共同发现人、诺贝尔奖的共同得主阿诺·彭齐亚斯拒绝签名抗议，认为“那是攻击而不是科学”。

物理学世界的不平静，包括对于物理学研究本身的一种从认知水平与关于优先权和组织两个角度的新批评。“物理学的危机”的文章在美国与欧洲到处泛滥。作为新批评的一个典型，我们来回顾一名英国的年轻物理学家的批评。他在 1974 年抨击：大科学系统导致“精英、竞争、‘巨人团’、官僚主义、企业管理意识，和经济集中以及决策权威”；还不止于此，因为它还窒息“自发性、独立性、原创性、创造力，以及甚至客观性”。他辩护说，在高能物理学中，这系统已经导致“一种时髦的成功，它变成了像呼啦圈一样的普及……青年物理学家逐渐认识到尽快地得到这一时髦是他的长项，不论它是否真的证明有成果，也不论他们是否真的相信它”。（Yaes 1974, 463）一位美国理论家迈克尔·莫拉夫克斯克采取了某些相同的观点，在一篇特征性的标题



《粒子物理学的危机》中，莫拉夫克斯克认为基本粒子物理学全错了，他相信部分原因可在社会学与方法论的混合体中找到。他宣称：舒适主义统治最坏的症状“淡薄主义，就是说，集中于围绕少量的时髦主题与进路所作的努力，它们更多的是被某些有影响力的物理学家的个人品格而不是被科学价值的通常准则所确定的”。（Moravcsik 1977, 92）他的批评被一名粒子物理学机构的代表，英国理论家约翰·玻尔金霍尼所回答。或许，有代表性地，80年代莫拉夫克斯克去研究第三世界的科学。而玻尔金霍尼则选择神学而不是物理学作为职业。70年代，高能物理学在社会学与认知上处于一种变动状态。

对于美国物理学家所建立的科学系统的反对意见，几乎全部涉及物理学的误用、物理学的组织以及缺乏社会责任感。它是一种根本的反对，但只是相对的。除去一切托词，它并没有质疑基本假设，诸如科学的价值或公认的科学研究方法。此外，它是一种伦理的而不是以明显政治分析为基础的意识形态的批评。许多欧洲物理学家强烈地信奉马克思主义，在美国的争论中找不到这一特点，那里“马克思主义”基本上不存在。左翼欧洲物理学家容易受马克思主义的直接激励，在某些情形中，要求科学有一个更根本的变化。只举一例，法国物理学家金斯-马克·列夫-列布朗德坚持：意识与科学不可分离；物理学的意识形态部分是科学认识论中的等级化，它赋予基本粒子物理学一种特权地位。（菲力普·安德逊与美国其他人提出了一个类似的观点，但不带意识形态的腔调。）科学意识的另一部分是“传统科学的精英与天才概念……专业与竞争的意识”。列夫-列布朗德与他的亲信问道：一门科学愈卷入日常生产与生活，就愈丧失其“科学”的本性，是怎么回事呢？他基于经典的马克思主义的论据继续说：科学“已经离开了它的原点，不再能从大量的大众知识中吸收养料与受到启迪了”；作为一个例子，他说及水的神奇（传统民间知

识)，并提议这现象要跟“关于高能质子-质子碰撞中的有效截面的具体细节”一样认真地加以考察。

反科学的叛逆

在基本层面上的对科学批评，有时包括摒弃如此这般的科学，不是 60 年代的发明。贯穿人类历史，科学一直不断地受到攻击。20 世纪 60 ~ 70 年代对科学的许多尖锐的批评可以追溯到 19 世纪或甚至更早的历史渊源。某类批评的典型说法可在 30 ~ 40 年代英国马克思主义结晶学家约翰·伯纳尔的著作中找到：科学在社会上是以错误方式被组织起来的，并被用于错误的目的，因此，它需要改变。然而，伯纳尔及其在 30 年代的“红色科学家”运动中的同志们并没有摒弃如此这般的科学价值；他们只是要求科学的社会实践最深层的变化。改变社会——从一种资本主义结构变成一种以社会主义为基础的社会——科学将治愈它的病。但还存在一些更老版本的对科学的批评。他们采取更极端的立场，其结论是否定科学而不是给科学重新定义。浪漫的或乌托邦的，以及常常是反知识的传统，强调主观地与直觉地从自然获得洞见。反对通常科学的客观性准则。活力论、反理性论与生活哲学论追溯到 1800 年，如果不是更早的话。在 20 世纪 70 年代，它们经历了一次复活。

批评的社会资源广泛而复杂，它们中有些几乎是不可比的。60 年代末涌现出一种有生气的、新的科学批评论，在其极端形式中，它要求摒弃通常理解的科学。有些批评受到一群主要是欧洲社会学家与哲学家，包括美国的马库斯、德国的泽根·哈伯马斯与法国的路易斯·阿尔修瑟和安德瑞·哥兹的观点的影响。按照马库斯与该时期其他哲学精英的理论，科学的实质就是利用。处于其原始的、“无政府的”状态中的自然一直被从外部来的科学



实施抽象所肢解——被强暴；于是，关于自然的科学知识变成等同于支配与利用。此外，高压手段建立起来的技术社会建立在物理科学基础上，因此，这些科学应对现代社会的高压与非人性化特征承担责任。马库斯宣称“现代社会的数学特征确定着创造力的范围与大小，把人性的非定量特征置于精密科学之外”。（Schweber 1994b, 144）马库斯与该时期的其他精英确实不太懂科学，甚至不太懂物理学，这些人对历史有何相干呢？他们的观点被大部分年轻一代所认真考虑。他们拒绝科学项目，把物理学家想象成军事与工业统治者效劳的无灵魂的机器。值得注意的是：在 70 年代反科学和激进反科学运动与 20 年代初以奥斯瓦尔德·斯彭勒思潮代表下的对待科学的态度之间，存在诸多明显或不明显的相似。同样，跟前苏联、第三帝国以及 30 年代末别的地方的情况也存在许多相似之处。1942 年，社会科学家罗伯特·梅尔顿将这种思潮称为“对科学前沿的一次袭击”，并警告那种他视之为威胁性的反理智主义的东西，“反叛科学”他写道：“[直到最近] 看来如此地不可能，以致只涉及思索一些偶然性的，不论如何遥远的胆怯的院士。现在，这反叛已经引起了科学家与外行人的注意”。（Merton 1973, 267）

属于一个十分不同于欧洲社会批评家的传统，托马斯·库恩 1962 年对于科学历史发展的分析，成为不满科学的另一类批评。库恩在约翰·斯莱特指导下获物理学博士学位，不愿加入反科学潮流。在其畅销书《科学革命的结构》中，库恩主张反对科学的实证主义观点，提出没有什么跨过革命变化时期的科学进步，暗示科学是以非理性方式发展的。对于许多年轻读者来说，这信息似乎是：物理学不比心理学、艺术史或文艺评论具有更多的科学性。现代天文学也不比旧天文学有更多的东西。发展了库恩的论题，奥地利-美国哲学家保尔·费耶阿本德走得更远，攻击科学与科学方法纯属跟宗教、神话与宣传相一致的意识观念；跟宗教

与神话相对照，只有科学变成了现时代的主宰教条，实行一种跟中世纪罗马天主教的专政比高低的精神专政。费耶阿本德主张废弃学校中的强制性科学教育，终止政府对一切科学活动的支持。“什么使科学如此伟大？”他问道，“什么使现代科学比亚里士多德科学或霍比族人的宇宙观更可取？”（Feyerabend 1978, 73）费耶阿本德认为，什么也没有。

库恩与费耶阿本德的言论形成科学史、哲学和社会学研究的另一种背景。最新近的时髦称为科学知识的社会学纲领，或社会构建说或 80 ~ 90 年代的构建社会学家否认科学世界观是基于自然的，因此，不应赋予比任何其他世界观以更高的优先地位。他们说，科学基本上是社会与文化的构建，由谈判、政治决断、修辞技巧和社会权力编织而成。既然真理与谬误总是相对于一个给定的局域构架而言的，科学家关于自然的信念不是固有地优越于任何其他群体的信念。在一本关于论现代高能物理学史的书中，那位由青年物理学家转为社会学家的作者得出结论说：“HEP [高能物理学] 的世界是社会产生的。……不强迫任何人按 20 世纪流行的那样构建一个世界观。”（Pickring 1984a, 406）这类观点，在大部分学术界中流行，不是大多数物理学家所爱听的。他们反驳说社会构建者一直在制造一种关于科学的“高级迷信”气氛，是反科学情感的叛逆者。

这一切跟物理学有何相干呢？在直接意义上，很少。费耶阿本德与马库斯的观点几乎不是在物理实验室中议论最多的话题。但是，对科学的批评以及 1970 年前后导致的对科学的普遍不满，间接地对于物理学也是重要的。作为一门硬朗的、“男子气”的、因跟军事应用有密切关系而（值得）尊重的科学，物理学变得受到比其他科学更厉害的攻击。许多聪明的大学生决定：研究社会科学，或者，生物学与环境科学更适合于他们的口味。一般地，学生中物理学的人数明显减少。



除了驾驭相对主义的潮流，或者，宣称物理学是男子汉的、资本主义的思维模式，还存在不同意已确立的物理学的其他一些方式。弗里特约夫·卡普拉，一名美国粒子理论家，相信他发现了现代量子理论与东方神秘主义形式（如禅佛教）之间的一种深层联系。他的《物理学的道》于1975年首次出版，受到广大读者的青睐，因为它跟那十年的时代精神十分合拍。不久，一系列相同的、学派不定的著作接踵而至。在某种意义上，卡普拉的意见与那些指控物理学是无灵魂的、唯物的事业的人们是相背离的。按照卡普拉的观点，量子物理学的洞见跟那些很久以前被东方神秘主义通过冥思与直觉所达到的境界本质上是一样的。共同的洞见包括：物理学基本上是主观的、是人脑的一种反映，而不是描述一个由粒子与场构成的自然。此外，卡普拉在“民主的” S -矩阵理论中发现了跟东方神秘主义最有说服力的相似。 S -矩阵已被大多数物理学家所摒弃的事实，似乎作者不以为意，而且，这事实或许不为他的大多数读者所知晓。《物理学之道》是跟反文化潮流相关联的一个代表，它并不摒弃如此这般的物理学，但提出对许多读者来说比权威版本更有吸引力的它种解释与外推。戴维·玻姆不同于量子力学哥本哈根解释的另一种进路，始于70年代之前许多年。但只在新的文化氛围中，他才沿着跟表征“新世纪”运动的神秘主义与整体主义直接共鸣的方向发展他的思想。他的“隐缠序”观念使他在广泛的各界中成为一个教派人物，但这观念对主流物理学根本没有影响。

物理学的终结

《在可见的未来，理论物理会终结吗？》这是斯蒂芬·霍金1980年就任剑桥大学有声望的卢卡斯数学教授时的就职演说的标题。霍金认为：物理学或者科学，在不远的将来或许在世纪之交

终结，是一种实际的可能。但是，物理学或者科学走到了尽头是什么意思呢？按照霍金的说法，它意味着：“我们也许有了一个描述一切可能观察的、关于物理的相互作用的完全、一致与统一的理论。”由于近来基本粒子物理学所取得的进展，他觉得“存在某种理由，使我们可以谨慎乐观地在某个时期内，看到一个完全的理论”。（Crease and Mann 1986, 410）有两点值得注意：第一，霍金所理解的“理论物理学的终结”一词是包容一切具体理论的一个统一而完全的理论的确立；第二，对于这个理论会被找到，霍金是乐观的，就是说，他相信那会是一件好事。在 80 ~ 90 年代，物理学的终结议题被广泛地讨论，出版了许多这方面的书。这议题的群众性反映了在企图统一物理学基本定律的努力中所发生的进步，远不是危机的症状。归根结底，许多物理学家将说，基本物理学的最终目标是产生一个完全的或终极的理论，然后，在某种意义上，进行自我终止。在消化了这个终极理论之后，就没有留下什么要做的事情了，至少没有什么值得一顾的内容了。

霍金清楚地认识到：物理学的终结议题有着一个悠久的历史。我在第一章详细描述了 19 世纪 80 年代迈克耳孙怎样预言物理学的终结的，虽然他心目中不是一个大统一理论。在量子力学早期成功之后，特别是 1928 年狄拉克关于量子力学的狭义相对论表述之后，有些物理学家就提出物理学接近一种完全的状态。这种乐观情绪是高涨的，而且，如帕尔斯所回忆的，“物理学几乎完成了”差不多形成一种普遍的感觉。这种感觉被狄拉克在 1928 年的一篇著名论文中表述为：“大部分物理学和整个化学的量子力学的所必需的基本定律已经完全知道了。困难只是这些定律的准确运用，导致过于复杂而不能求解的方程。”（Ktagh 1990, 267）

不久，证明狄拉克的乐观是没有根据的，相对论量子力学产



生了各种严重问题。跟霍金一样，狄拉克关于终极理论的观点是还原论的。一个真正完全的理论，以一组方程的形式，被指望以演绎方式说明一切现象；在这意义上，现象可归结于终极理论的特殊事例。理论还原主义的理想可以在狄拉克以前许多年找到，例如，这理想是1912年前后嘎斯塔夫·米统一场论的方法论基础。爱因斯坦也是这一观念的赞成者。1918年在纪念普朗克60岁生日的讲话中，他说，物理学的最终目的是“达到那些普适的基本定律，从中经演绎可构建出宇宙来。”

继1928~1930年的过早乐观之后，经过了一段很长的时间，才由量子理论恢复了终极理论的讨论，20世纪30~40年代发展起来的米尔恩与爱丁顿的演绎理论，允诺整个宇宙的一种先验知识，包括“说明”诸如精细结构常数之类的自然常数。爱丁顿未完成的“基本理论”是一个提供一个终极理论的宏大企图。它跟早期的企图的不同，只是更加非正统与更加暧昧而已。在1949年一篇标题为《明天，任何物理学？》中，乔治·伽莫夫询问：物理学的未来是否“以永远广阔视野为我们提供未来探索的无限可能性”？或者，换种说法，物理学会收敛于“一个完全而自恰的基础物理学知识系统，具有彻底探索过的、不再指望任何新的瞩目发现的根基吗”？（今日物理，1949年1月17日）伽莫夫主张：基础物理学原则上能以4个基本常数（他选择 c 、 h 、 k 和一个基本长度）为基础，并且，提出：如果这个时候的物理学达到了它的目标：

如果且当所有支配物理现象最终被发现，且所有出现于这些定律中的经验常数最终通过4个基本常数表达出来，我们就能够说物理科学达到了它的目标，没有有兴趣的事留给未来去探索了。剩下给物理学家要做的事，或是在较小细节上的繁杂工作，或是对于已完成的

系统作自我教育与鉴赏。在那阶段，物理科学便从哥伦布与麦哲伦纪元进入到国家地理杂志纪元！

伽莫夫不要求一个单独的、从它可推导出一切理论的统一理论，只要求基础定律为已知，不论它们关联不关联。在伽莫夫发表其论文的同一年，爱因斯坦在他的自述中表达了他深深怀有的信念：“自然是这样构造的，以致有可能逻辑地建立如此强确定的定律，在其范围内只有理性地、完全地确定的常数才能发生（因此，不是那种其数值可变的、对理论不损害的常数）。”（Schilpp, 1949, 63）

理查德·费曼，又名物理学家，他也相信科学知识在基本层面上是有限的。因此，总有一天，科学会达到这个层面。1965年他写道：“事情不会老是这样进行下去，致使我们总是发现越来越多的新定律。”跟伽莫夫一样，他利用地球探险的比喻来讲明他的观点：“我们很幸运地生活在我们仍旧做出发现的时代里，它就像美洲的发现——你只能发现一次。我们生活于其中的时代就是我们发现基本定律的时代，而且，那一天不会再来了。……[将来]会有观念的退化，正像当旅游者在一个地域开始行走时，伟大的探险家感觉到出现的退化一样。”（Feynman 1992, 172）虽然伽莫夫、爱因斯坦与费曼指的并不是一个统一的理论，他们关于物理学的终结的观念十分相似于90年代许多理论家的观点。他们相信一个从它可流出一切说明箭头的终极理论。逻辑上，这理论不是不可避免的，但是，它在逻辑上是孤立的。就是说，“每一个自然常数都可以从第一原理计算出来。……我们基于纯数学与逻辑就会知道为什么真理会丝毫不差。”（Weinberg 1993, 237）不论终极理论的式样是什么，温伯格有信心认为那是量子力学的。这个观点几乎是一切统一论者所共有的。

大多数粒子理论家关于终极理论的说法都是还原论的，而



且，以科学的等级观念为基础的。这一信念一直受到许多哲学家和少数物理学家的挑战。70 年代反对宣称高能物理学的认识论具有优越性的菲力普·安德逊的批评包含这样的观念：“把每一事物归结于简单的基本定律的能力，并不包含从这些定律出发重构宇宙的能力。事实上，基本粒子物理学家关于基本定律的本性告诉我们越多，他们似乎越少关联于科学其余部分的实际问题，关联于社会的实际问题就更少得多了。”（Anderson 1972, 393；以及参阅第 21 章）安德逊指出：关联于现象的是方程的解而不是方程本身，而这些解是专适合于自然的不同层面的。虽然原子与分子是由夸克与轻子构成的，它们遵从基本粒子物理学的定律，原子物理学、化学和固体物理学不可能归于基本粒子物理学。如果接受这种“涌现”观点，那么，就没有理由一个终级理论会是一个“每一事物”的理论，因此，终极理论不是通报物理学的终结，只是基本的高能物理学的终结。

“物理学的终结”可以理解为关于最终的、统一的理论根本无事可做了。我们知道，物理学可能终结，只是因为人们对它丧失兴趣，或者，因为政府或基金机构决定不需要以实质的规模支持基本粒子物理学。这种暗淡的警告并不新鲜，但在 20 世纪行将结束之时，它们的呼声变得更加频繁、比以往更喧哗了。它们也是被那些因 20 多年来缺乏真正振奋的发现而担心另一次危机的物理学家们呼喊出来的。对有些人来说，似乎 70 年代的危机又回来了，内外因素的结合使得物理学家的生活艰难。由于 1990 年苏联的解体，东欧与苏联的物理学家变得特别困难。西方世界的物理学家比东方的同事日子好过得多，倒有点聊以自慰。李奥·卡达诺夫，美国大师级凝聚物质物理学家，1992 年注意到：“科学家被低估”，而 70 年代的反科学态度政治上仍是吃香的。“我们正在进入这样的境况，在其中无人相信我们说的每件触及我们切身利益的事。我们的种种努力不能够阻止我们的人数、对

我们的支持或我们的社会价值的降低趋势。……今天当公众想到科学的产品时，很可能就联想到环境问题，粗心的与不诚实的‘科学’报告，里佛莫的为‘永远裸者’欢呼，以及大量的自助噪声，其主题从地球的警告到‘上帝的脸面’。”按照卡达诺夫的观点，与境况一样严重的，不是科学终结的序曲，而可能是 21 世纪科学，特别是物理学大削弱的序曲：“在最近几十年里，科学高度受宠，一直是社会关心与关注的中心。如果这种反常消失，我们不应该惊讶。我们都会因这种发展而失望与受到伤害，但如果我们能退一步，以某种透视眼光看这局面，那么，我们所有科学人可以说，我们是这个值得花精力的事业的一部分。”（今日物理，1992 年 10 月 10 日）

第二十七章 | 统一与猜测

关于统一的问题

到1918年，人们知道了爱因斯坦的广义相对论描述引力，而麦克斯韦-洛伦兹理论描述电磁场。当时承认存在这两种基本的力。因此，把这两个理论统一起来是自然的事。外尔（1918年）与爱丁顿（1921年）的场论属早期统一方案之列，都是物理学几何化的新纲领。克里希斯伯大学的数学家铁奥多·卡鲁扎的进路跟外尔的不同，但目标是一样的。在1921年的一本著作中，卡鲁扎着手这样的问题，提供“一种**完全的世界图像**……[它]是人类精神的伟大抱负之一。”（Vizgin 1994, 151；强调是原有的）卡鲁扎假设一个五维黎曼空间，在四维通常时空之外，补充一个额外的、假设的世界维度。第五维的物理意义不清楚，但卡鲁扎发现在这维度中，粒子的轨迹总是闭合的。此外，他的五维场论，基于14个势（10个引力势和4个电磁势），同时包含引力的广义相对论与电磁学的基本方程。开始，爱因斯坦觉得这理论有吸引力，但不久他跟其他几个场论专家得出结论：它跟物理世界无缘。卡鲁扎与早期统一论者没有把量子世界并入他们的

方案之中只是懵懂地意识到：量子理论多少会改变统一游戏。早在1916年一篇论引力波的论文中，爱因斯坦就评说了：“量子理论必定要修改麦克斯韦的电动力学，而且，也要修改引力的新理论。”卡鲁扎同样承认“任何宣称具有普适意义的假说都受到现代物理学——量子理论——这个人面狮身的威胁。”（Vizgin 1994, 158）可是，爱因斯坦与卡鲁扎在他们的统一理论中都没有利用量子理论。

1926年，在薛定谔波方程出现后不久，奥斯卡·克莱因提出把卡鲁扎的五维理论扩展到覆盖量子现象。在克莱因的理论中，第五维坐标虽不可观察却具有物理意义——就是说，一个跟电荷共轭的量。这样，他希望作为一个量子条件能够说明电荷的原子性，同时也说明物质的基础砌块——电子与质子。利用假设五维空间在第五维方向的闭合具有一个确定的周期 λ ，克莱因坚持：“普朗克的量子起源，可以在第五维的这个周期性中找到。”就是说，他想要说明作用量子，而不是接受它是一个不可简约的自然常数。至于这个周期，他提议 $\lambda = hc(2\kappa)^{1/2}/e$ ，这里 e 是电子的数值电荷， κ 是爱因斯坦引力常数。1926年秋，克莱因在《自然》上写道：“这个长度的值很小，”即 $\lambda = 10^{-30}$ 米，“可以说明在普通的实验中，第五维因对其取平均而观察不到。”20年代后期，五维卡鲁扎-克莱因理论受到相当的关注，被许多理论家所考察，包括前苏联的弗拉季米尔·福克、比利时的里昂·罗森费尔德、法国的路易斯·德布洛意和美国的德克·司特鲁克。可是，从1930年前后起，大多数理论物理学家失去了对该理论的兴趣，觉得它似乎远离物理学的检验与应用。像许许多多统一理论的后继者一样，卡鲁扎-克莱因理论逗留在物理学周边许多年，被认为只是猜测与具有数学意义。

可是，很久以后，卡鲁扎-克莱因理论经历了一次复苏。20世纪70年代中期，约埃尔·薛克、爱德华·维顿与其他人，联



系到扩展爱因斯坦广义相对论的各种超引力理论，重新考虑了这一理论。超引力，广义相对论的一个超对称性版本，是1976年由丹尼尔·弗里德曼、彼特·范纽温惠泽恩与其他人发明的。1980年左右，卡鲁扎-克莱因多维理论是理论物理学的热门领域，跟诸如超弦理论等各种量子引力新方案相互作用与竞争。虽然卡鲁扎-克莱因理论可以在五维中来做，最流行的再生卡鲁扎-克莱因理论，却寻求在十一维空间中获得统一。可是，虽然发现卡鲁扎-克莱因理论的超引力版本在数学上是迷人的，它所预言的粒子跟自然中所知道的粒子不相似。几经努力与热情，它证明不会比20年代的原始模型更好。

人们从不同角度着手研究调和量子力学与广义相对论之间的矛盾。一种方法是企图把引力场量子化，典型手法是采用量子场论中把电磁场量子化的类似方法。利用1929年的海森伯-泡利的量子电动力学理论，似乎弱引力场暂时可以按电磁场同样的方法处理。海森伯与泡利过分乐观地宣布“引力场的量子化可以利用一个完全类似于这里所用的〔他们的1929论文〕程序毫无任何新困难地实施”。不久，证明问题比预期的困难得多。第一个把新量子程序应用于引力的人是罗森费尔德，1930年他研究了他所谓的“引力量子”。一个更充分与更有抱负的、整合量子力学与广义相对论的努力，是俄罗斯物理学家马特维·布朗斯坦在1933~1936年间作出的。布朗斯坦讨论了统一的“ cGh 物理学”，考察了广义相对论的、在后来称之为普朗克长度 $l_p = (hG/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}$ 米条件下的种种量子极限。可是，在物理学的焦点集中于原子核、宇宙辐射和量子电动力学的时候，布朗斯坦的工作没有引起人们的关注。只是在50年代，由于复苏了对广义相对论的兴趣，引力场的量子化问题才被少数物理学家着手处理。也只在那时普朗克标度，包括普朗克质量—— $(ch/G)^{1/2}$ 或约 10^{-5} 克——才在物理文献中首先被克莱因与约翰·惠勒、狄拉克、彼特·伯格曼

和其他人所公开讨论。他们从事新的、所谓量子化的正则方法。这一进路 1958 年到达高峰，当时，狄拉克成功地把广义相对论写成哈密顿形式。利用这种形式的理论，把量子化规则应用于引力场就相对容易了。1959 年狄拉克提议引力的最终量子化可称为“引力子”，这个名字立即成了物理学家词汇的一部分。他显然不知道：引力能量量子化的名字引力子，已经由德米特里·布洛欣采夫与 F·嘎尔佩林在 1934 年一篇论文中引入了，只是这篇论文仅在俄罗斯出版。

大统一理论

到 1973 年，电弱理论与新的色动力学（QCD）已就位，广泛地被认作是弱的、电磁的、强的三种基本的力相互作用的好理论（第 22 章）。跟温伯格-萨拉姆电弱理论相联系的对称性知道是自发破缺的 $SU(2) \times U(1)$ 对称性，QCD 的对称性是一种 $SU(3)$ 对称性。 $SU(2) \times U(1)$ 规范理论是第一个成功的统一理论，但在用词的意义，它不是一个真正的统一理论。它的运作有两种不同的相互作用与相关的两个耦合常数。电弱理论向强相互作用的覆盖扩展，可通过将 $SU(2) \times U(1)$ 扩展到 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 而最直接地实现。在这情形中，理论会同时处理轻子与夸克，但它仍然基于不同的群、不同的耦合常数以及不同的基本粒子。1974 年早期，哈佛大学的霍沃德·乔治与谢尔登·格拉肖在一个纲领论文中提出：自然中三种力的正当统一应基于一个称为 $SU(5)$ 的单一群。它不同于两个群 $SU(3)$ 与 $SU(2) \times U(1)$ 的纯粹组合。“我们提出一系列的假说与猜测，”两位理论家写道，“它们不可避免地导致 $SU(5)$ 是世界的规范群的结论——所有基本的力（强的、弱的与电磁的）都是同一个只涉及单一耦合强度、精细结构常数的基本相互作用的不同显露。”（Zee 1982, 46）



在这大统一理论的第一个例子中，乔治与格拉肖主张：在 $SU(5)$ 图像中，三个耦合常数在极大的能量下融合为一个单一的耦合常数，或者，在极短的距离上，等同于同一件事。跟大多数其他统一理论相对照， $SU(5)$ 理论直接相关于经验物理学。按照乔治与格拉肖进路，在 $SU(5)$ 理论中，电弱理论中一个确定的、经验可测定的量（参量 $\sin^2 \theta_w$ ， θ_w 称为混合角，或温伯格角）可算得值为 $3/8$ 。在温伯格-萨拉姆电弱理论中，这个量只能由实验确定。 $SU(5)$ 的另一个迷人的特点是：它说明了电子与质子的电荷数值相等，就是说，为何氢原子是中性的。在 $SU(5)$ 问世前，电荷相等性一直被认为只是自然的偶然事实，在基本理论中无其基础。60 年代早期，厄曼·邦迪与瑞芒·里特列顿提议可能存在一个些微的但宇宙学上重要的电荷差，对这一提议的实验证明：电荷的盈余，如果存在，会小于 $1/10^{20}$ 。有了乔治与格拉肖理论，现在存在理论上的理由使人相信：正、负电荷是准确相等的。更具戏剧性的是，这理论预言质子是不稳定的，中子也如此，即令它们被束缚在非放射性的原子核中。 $SU(5)$ 统一理论不仅囊括了夸克、轻子以及电磁交换粒子（光子与重 W 与 Z 玻色子），还包含一群称为 X 粒子的超重、带色的矢玻色子。它们是具有两种符号分数电荷 $1/3$ 或 $4/3$ 所要求的。有趣的是，新的粒子会引起夸克与轻子之间的转换，这种相互作用是早先的理论所不允许的。作为一个例子，乔治与格拉肖描述了质子通过质子内一个上夸克传递一个 X 粒子给它的下夸克的机制衰变为一个正子与一个中性 π 子。这的确是一个令人瞩目的预言，乔治与格拉肖觉察到的理由之一是：“我们的假说也许是错的，我们的猜测也许是无效的。但是，我们方案的独特性与简明性足以使人把它当真。”

乔治与格拉肖的进路很快被乔治·赫伦·蒯因与斯蒂芬·温伯格所发展。数月后，他们用重整化群技术计算出有效耦合常数是能量的函数。他们认识到：原始的混合角常数 0.375 只在统一

能量为极端特征量值时（约 10^{15} GeV）才有效，在低能时发现为 0.20。1974 年该预言值明显小于最好的实验值（约 0.35），但后来的实验给出的结果跟理论值非常一致。到 1980 年，实验值往下移到 0.23 ± 0.02 ，这自然鼓励物理学家认真看待该理论。乔治、蒯因与温伯格的计算使他们得以估计出超重波色子的巨大质量 10^{17} GeV，离普朗克质量不远了。因此，提示了跟引力理论联系的可能性。关于质子的寿命，三位理论家提供了第一个理论估值，为 $10^{31} \sim 10^{32}$ 年。跟乔治与格拉肖的提示相一致，预言质子衰变是被一个 X 波色子媒介的。例如，它使质子变成一个中性 π 子与一个正子。因 π 子衰变为 γ 光子产生的电子对会留下一个明晰可测的电子轨迹（ $p^+ \rightarrow \pi^0 e^+$ ； $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ； $\rightarrow e^- e^+$ ）。

由于乔治、格拉肖、蒯因与温伯格的工作，以及阿布达斯·萨拉姆与约吉什·帕蒂的独立工作， $SU(5)$ 统一理论作为大统一理论，或简称为 GUT 理论成功发展为标准模式。他们很快被那些认为这也许是迈向长期追寻的、关于自然力的统一的重要一步的物理学家所采用。按照一名物理学家的说法，“大统一的理念使我们从梦幻地存在于对称性破缺的碎片中解放出来，在物理学史上从未有过的想象力的巨大跳跃中梦想那在 10^{16} GeV 中的‘真正’物理学。”到 1981 年，一个小的、但扩展着的大统一工程成为现实。这一年一篇关于大统一理论的论文的评论含有 800 个参考文献。

关于质子可能的不稳定性曾被外尔于 1929 年简短地提示过，只是被拒绝了。1938 年，恩斯特·斯丘克伯格明确地宣布：“在物质的一切变换中，从来没有观察到重粒子（中子与质子）的嬗变。因此，我们将要求一个关于重子数的守恒定律。”（Pais 1986, 488）斯丘克伯格关于核子守恒的经验定律导致战后的重子守恒定律。（“重子”的名字是阿布拉罕·帕斯 1954 年提出的。）虽然这一定律一般被认为理所当然，少数实验家在这主题因



$SU(5)$ 的预言变得时髦之前许多年就在寻找中子衰变的蛛丝马迹。1954年弗瑞德里克·莱尼斯与克莱德·科万准备好了作实验，两年后，导致探测到中微子。莱尼斯与科万跟毛里斯·哥尔德哈伯合作认识到：他们的探测实验也可用作建立质子寿命的下限，并于1954年得出结论：质子寿命大于 10^{22} 年。后来，更精确的实验在南非金矿地表下3.2千米处进行，测得下限是 2×10^{30} 年，这是理论预言值的邻域，但这实验原是用来探测中微子的，跟探测质子衰变没有直接关系。事实上，到1974年，为了达到必要的灵敏度，实验运行了差不多了3年。反正都一样，当莱尼斯与克罗奇1974年初公布结果时，他们确实把他们的实验关联于“近来的兴趣是考察这种可能性，即重子数守恒可能不是一条绝对的原理”。

根据GUT理论所预言的，特别是1974年计算出质子寿命可能是 10^{31} 年（而不是有些理论家所计算的 10^{37} 年）时，对质子衰变实验的兴趣戏剧地增长。在美国、印度、日本、前苏联和东欧出现一系列的关于大统一的大科学实验。首当其冲的实验是跟美国许多实验室合作的、在俄亥俄州的深盐矿井中进行的。这一实验安装了10 000吨纯水，探测系统重8 000吨，用了2 000个光电倍增管。实验中没有发现衰变的质子；虽然80年代有其他实验报道发现了质子衰变的几个可能的候选者，但它们无足轻重。在接下来的十年里，情况无实质的变化。实验越做越大，耗资越来越多，但没有发现质子衰变的迹象。

大统一理论不仅是数学计算，而且也可能涉及大科学。这可从日本-美国合作的超级神冈核衰变或中微子侦测实验项目看出。这是世界上最大的中微子探测站，一个盛50 000立方米水、环绕着13 000个光电倍增管的切伦科夫探测器，足以探测到单个的光子，坐落在东京以北的神冈矿井之中。从1996年运作以来，一直在寻找核子的衰变，但迄今为止，探测是失败的。观察质子衰

变的失败是否意味着大统一理论被证伪了？不；实验结果证明原来的理论是不适宜的。但不能解释为如此这般的 GUT 方案的失败。许多其他的 GUT 登场，它们导致不同的寿命以及不同的衰变模式，所以，GUT 本身是不容易证伪的。

质子衰变的预言不是 1980 年前后 GUT 被极度关注的唯一原因， X 玻色子的物理效应是 GUT 被关注的另一个原因， X 玻色子及其效应在常温下是不可观测的，或近似不可能，但可以指望它在支配早期宇宙的甚高温下发生重要作用。为了研究 X 粒子的物理效应，甚早期的大爆炸宇宙是理想的实验室（而且，由于能量的量级是 10^{15} GeV，远远超过任何可思议的加速器的能量，那是唯一现实的能量）。早在 1967 年前苏联物理学家安德列·萨哈诺夫——也许作为一名持不同政见者更有名气——曾提议重子数可能不是严格守恒的，而且，这不守恒可能具有重大的宇宙学意义。他的提议没有吸引太多的注意，只是在 1978 年当日本人吉村利用新的 GUT 预言由原生的 X 玻色子引起重子-反重子的反对称时，宇宙学才变成 GUT 的一个重要部分，反之亦然。

虽然超级神冈中微子侦测实验没有发现任何衰变的质子，它并非运作失败。1998 年，宇宙射线中微子的资料表明中微子振荡的存在。那就是， μ 中微子变成了非正常电子中微子的另外一种中微子。这报道使粒子物理学家大为振奋，因为振荡意味着至少所涉及的一个中微子必定具有质量，因此，标准模型必须修改。

超弦理论

在某些物理学家看来，大统一理论给人印象深刻并易于理解，他们同时认为仅有这两点仍是不够的。从方法论的观点，它们不是基于一基本原理，而是包括几个自由常数，诸如耦合常数以及夸克与轻子质量，这些误导了大统一理论。20 世纪末一个



完全的统一理论最时尚的后继者是超弦理论，它包含了一个引力的量子理论，而且，避免了自由参数。可是，超弦理论原先并不是企图解决统一量子力学与广义相对论的老疑难而发展起来的。

现代弦理论始于为理解强相互作用的 S -矩阵启发纲领的脉络中。1968 年，意大利理论家嘎布里勒·维尼兹阿诺为说明一定的碰撞过程提出了一种强子模型。两年后，约奇罗·纳姆布与其他人把维尼兹阿诺的理论解释为弦模型，而非粒子模型。可是，很快就证明维尼兹阿诺-纳姆布的弦模型是非物理的。它们只是描述玻色子，要求二十六维时空，而且，预言一种无质量的、自旋为 2 的粒子，以及快粒子作为质量谱的基态，快粒子是速度比光快的假说中的粒子；虽然它们跟相对论一致，却不是可接受的量子粒子。

70 年代早期，多少更现实的弦理论，十维的“对偶子 π 模型”，被约翰·施瓦兹与安德列·列夫发现。新理论既包容费米子又包容玻色子，成为早期的弦模型的一致理论，时空必须赋予十维，一个时间维度与九个空间维度。不可避免出现的无质量的、自旋为 2 的粒子的出现，原先被视为一个毛病，因为这些粒子不可能与强子物理学有任何关系。可是，1974 年，施瓦兹同法国物理学家约尔·薛克合作，认识到该粒子可能是一个引力子，把困难转化为一个优点。直到那时，弦理论一直是强相互作用的一个理论，没有牵涉到引力。现在，这理论重新解释为一个统一一切基本力的理论的候选者。计算证明：如果引力常数有其正确值，那么，弦的长度标度需接近普朗克长度——就是说，比原先强子弦小许许多多。理论的对象，弦是跟出现与标准模型中的粒子（轻子与夸克）很不一样的。弦是长为 10^{-35} 米的一维曲线，有开型与闭型两种。弦的张力极大，对应于 10^{19} GeV 的能量。弦的激发或振动被解释为给出基本粒子的能谱，希望包括那些经验上已知的粒子，以及确定地包括（多少有点烦人的）其他粒子。

在超弦理论中，有许多粒子对应于一种给定的振动，所有已知的粒子都假定为弦的基态所描述。必要的十维多了六维，但6个冗余的维度以跟卡鲁扎-克莱因理论中第五维相似的方式，弯曲起来或被“紧致化”，它们是不可观察到的。

对弦的兴趣局限于50年代，部分原因是继1974年“11月革命”而来的QCD的成功。然而，少数理论家继续从事弦理论，到1980年它就变成了超弦理论——即，并入了时空的超对称性。在超对称性的理论（SUSYs）中，所有粒子具有假说中的伴粒子，诸如“超夸克”、“超电子”、“光微子”和“引力微子”。例如，一个超电子是一个超对称变换后的零自旋电子。超电子与其他奇怪的超对称伴粒子均尚未被发现。并入超对称性的一个好处是快子基态消失了。80年代早期的超弦理论具有数学上的意义，但不可能具有太多的物理相关性，甚至在理论水平上还有许多严重问题，即理论受到无穷大的困扰和技术上的所谓反常性。反常性是，当理论量子化时，破坏对称性或守恒定律，从而理论不一致。还有其他的一致性问题的，诸如十维似乎跟超弦理论的正确形式不相容。

1984年夏，施瓦兹与他的英国合作者迈克·格林，凭借爱德华·韦顿与其他人的工作，给理论带来新的生命。他们证明：如果理论被称为 $SO(32)$ 与 $E_8 \times E_8$ 的一个内部对称群支配，那么，所有的反常就会互相抵消。在 $SO(32)$ 超弦中，电荷守恒是纳入引力的一个结果。这理论是施瓦兹首先发现的。在这突破之后不久，韦顿提示： $SO(32)$ 怎样可以被列紧化而给出一个四维理论。施瓦兹-格林的论文开创了被称之为“超弦革命”，其发生几乎是常规规范场论“革命”之后的十年。1984年革命的一个重要成分是超弦理论一个新版本的发展，普林斯顿大学的戴维格罗斯与他的合作者称之为杂交理论。杂交理论以 $E_8 \times E_8$ 群为其基础，只允许闭合弦。作为较早二十六维玻色超弦理论和新的十维超对



称理论的混合体，杂交理论被认为在连接低能世界方面很有希望。到80年代末，关于所知道的3个一致的超弦理论的一个引人注目的特点是：它们都是独一的、完全没有调节参量。超弦理论的数学结构编织得十分精巧，不可能被拆开。这个特点强烈地吸引着许多理论物理学家。在跟规范场论传统的对比中，超弦理论的整个发展是数学的，没有输入任何实验室的实验资料，也没有基于超弦理论提示的新的实验。

由于1984年秋的发展，超弦理论在擅长数学智慧的理论家中变成了时尚。一种潮流效应出现了。在1975~1983年间处理弦理论的论文每年不到100篇，而在1987年在这主题上就发表了1200篇论文（见图27.1）。超弦理论作为一个伟大成就、百年老梦接近实现、通向新物理学的阶石、长期以来梦寐以求的量子引力而被欢呼。至少，超弦理论家们自己是这样看待局势的。韦顿期望：对于超弦的即刻期待的正当解释会“涉及我们关于物理学基本定律的概念的一场革命”。（Davis and Brown 1988, 97）他宣

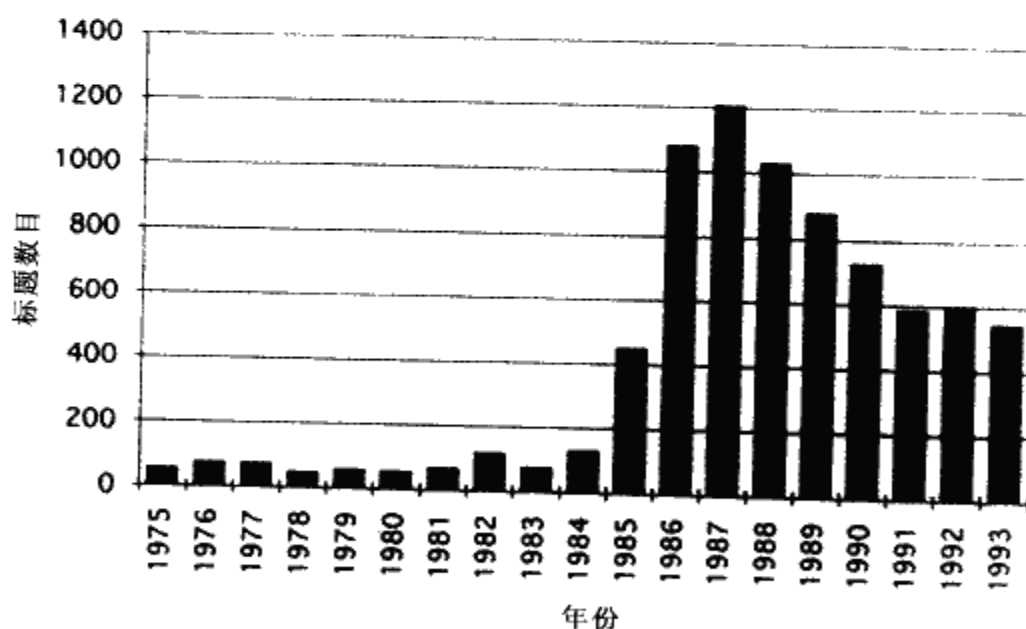


图 27.1 弦与超弦的论文数。来源：Calison 1995.

布这理论“将主宰下半个世纪，正如量子场论已经主宰了前半个世纪一样”。（《今日物理》1985年7月20日）施瓦兹则提议杂化理论很可能是神秘的“每一事物的理论”（TOE），它原则上意味着基本物理学的终结。

自我标榜的超弦革命不是令所有的物理学家都高兴的。超弦理论似乎有许多问题，其主要问题是它明显地缺乏跟实验的联系。理论不预言可被检验的非平凡之事；虽然它被认为包含低能物理学，可是，粒子以及通常物理学的结果实际上不可能从理论中演绎出来。无怪乎，许多高能实验家接受理论并不热情。在1984年超弦突破几年以后，一场激烈的争论开始了。在反对一个只能用数学手段“检验的”理论的方面，实验家不是孤立的；许多不喜欢理论缺乏跟实验接触的理论家参加了进来。在反对与怀疑的人中有费曼、伽莫夫、施温格与乔治，而温伯格与萨拉姆则积极从事超弦理论的研究。格拉肖是最为公开反对超弦论者的干将之一。他批评他们自负地用关于唯一性与美的纯数学思考来取代真理的经验观念。1988年格拉肖写道：“除非弦论者能够解释真实世界的可感知性质，他们简直不是干物理学。”他浮夸地问道：“难道他们应该被大学付工资，允许他们去使易受影响的学生堕落吗？……超弦的思想更适合于数学系，或者，神学学校，而不是物理系，难道不是这样吗？”（Galison 1995, 399）对于格拉肖来说，超弦理论家“是继怪诞版本的疯狂幻想家”，而超弦时尚是一种“远比艾滋病更易传染的”疾病。（David and Brown 1988, 191）温伯格承认把超弦理论跟可观察检验的物理学图像结合起来的困难，但他不把它视为一个缺陷：

终极理论将是因其数学一致性而成形。然后，仅当你解决了理论看到了在可接近的能量上它为物理学预言的东西时，物理解释才会来到。这是在一个不直接接近



实验的王国的物理学，引导原理不可能是物理直观的，因为我们不可能有处理那一标度的任何直觉。理论必须受到数学一致性的制约。我们希望这将导致一种理论，具有看来像是可接近能量的真实物理世界的解。（David and Brown 1988, 221）

90年代早期，对超弦的兴趣下降了。但到1998年，乐观与兴奋回到了超弦共同体。其中的主要原因是：所谓的 M -理论、 P -理论与 D -理论的新发展，它们是各种推广的超弦理论。新的工作允许种种方法把超弦理论的结果跟更常规的规范场论的结果联系起来。

量子宇宙学

利用粒子物理学揭示和构成宇宙学，这一思路可以追溯到30年代早期基本粒子物理学的开端，它曾在40年代晚期伽莫夫、阿尔夫和厄曼的开创性工作中起着重要作用。由于60年代和70年代高能物理学的发展，宇宙学（与天文学）与粒子物理学之间的密切关系增强了。按照有些物理学家的看法，这种关系改变了整个宇宙学的地位：“在观念不仅被产生而且在实验室中被检验的意义上，看来……宇宙学已经变成了一门真正的科学。这是从久远纪元传来的呼唤。从中宇宙学理论激增。除了诉求美的鉴赏比较之外，很少有方法去证实或拒绝它们当中的任何一个。”（Schramm and Steigman 1988, 66）此外，对热大爆炸模型的信心使人们用这模型去获取关于甚早宇宙极高温度下粒子物理学的洞识，其能量远远高出地球上任何一个加速器所能产生的能量。这样，早期宇宙就成为人们所常说的“廉价人造加速器”，而且，高能物理学与宇宙学进入一种增长着的共生关系。50年代的核物

理学已是一个确立的领域，而粒子天文学只在 70 年代，才作为物理学的一个有生命力的子领域涌现出来。例如，共生显现在 1992 年创办的期刊《天文粒子物理学》上。

按照 1980 年前后被许多物理学家所接受的大爆炸剧情，超稠、超热的普朗克宇宙开始期（第一个 10^{-43} 秒）由量子引力主宰，因而，处在通常科学知识所能及之外。由于爆炸之后的冷却与降温——如果温度仍很高——能量是 10^{16} GeV 或更高。在这阶段，按照大统一理论，强力、弱力与电磁力是统一的。进一步膨胀，在零时刻之后的 10^{-33} 秒到 10^{-12} 秒之间经历了先是强相互作用、后是弱与电磁相互作用的凝出或对称性破缺。在这阶段的结尾，相信 X 玻色子与 W 玻色子已停止产生，色力只以核子的形式存在。继后更冷的阶段，对高能物理学就没有多大关系了，它们对应于实验室中可观察到的能量。

如二十三章所述，从大爆炸计算产生的、关于粒子的最早与最重要的结果之一是：为了跟观察到的氦丰度相一致，中微子的种类数是 4。这结果是 1977 年由嘎里·斯塔格曼、戴维·施拉姆和詹姆士·嘎恩得到的。进一步的精细计算，导致三种中微子的较低限度。1993 年，这个纯出于宇宙学论据的预言，被 CERN 的大电子正子机（LEP）的结果所证实，其结果是的确存在三种中微子。如施拉姆注意到的，“在某种意义上，这是第一次粒子对撞机得以验证一个天文学论据。同时，它也表明：天文物理学跟宇宙学的联姻确实是完美的。”（Schramm 1996, x vii）对中微子种类数的界定，可推断中微子是无质量的，或者，几乎如此。不能排除重 τ 中微子的可能性，但 1991 年的计算表明：原生核综合要求 τ 中微子的质量小于 0.5 MeV，这个结果跟实验所得到的一致，但更精细些。因此，这提供了早期大爆炸剧情的另一个检验。中微子家族数被限定于 3 个，一般认为意味着：所有基本粒子（轻子与夸克）的家族或“代”的数目也被限定于 3 个。



上述宇宙学计算仰仗与支持标准电弱模型，不是包含强相互作用的大统一理论。新的 $SU(5)$ 型的大统一理论立即被应用于宇宙学中从未被说明的问题之中。问题之一涉及物质对于反物质的近乎完全的主宰。人们从来不知道，为什么宇宙不存在任何反物质？追随狄拉克 1933 年的猜测，1956 年，毛里斯·哥尔德哈伯认为：粒子与反粒子的对称性扩展于整个宇宙。他提出：宇宙可能是由一开始就分离的一个宇宙与一个“反宇宙”所组成。少数物理学家同意：宇宙在特大的范围内，关于物质与反物质是对称的。但这仅是少数几个人接受的理论。到 60 年代，瑞典物理学家与后来的诺贝尔奖得主罕尼斯·阿尔文提出一个两种形式的物质等量的宇宙学理论。他的理论被忽视或被拒绝，不仅因为它是作为反对大爆炸模型而发表的，而且因为没有它所要求的大量反物质的痕迹。到 1975 年反物质问题已讨论了 20 年，仍未找到说明。公认的观点是：物质的非对称性，或重子的不等性，是某种原因造成的、宇宙初始条件的一部分。就是说，不是说明非对称性，而是把它归结于一种偶然的事实。

由于大统一理论包含重子数不守恒，很容易得到不对称性的一种说明。1978 年，吉村在其工作中，假设一个初始对称的宇宙，并证明：重子数守恒的破坏以及 GUT 的 CP 的不变性，导致在 $t=0$ 的创生之后立即有个粒子对于反粒子的盈余，在这甚早宇宙中 X 粒子的衰变率，不同于反 X 粒子的衰变率，造成夸克与轻子数不同于反夸克与反轻子数。余下的事情就由湮没去完成了。目前粒子世界的粒子组成可以看作是早期大统一的一种结果。1978~1980 年间，吉村、温伯格、弗朗克·维尔兹克与其他人进一步利用 GUT 解决了宇宙学其他一些问题，即粗略地说，为什么宇宙是如此空旷？宇宙可见部分的重子数约 10^{79} （爱丁顿数），光子是 10^{88} 。这个比例被认为是一个基本的量，因为理论规定它是不随时间改变的。为什么光子数是重子数的十亿倍呢？按照

GUT 的推理，事情并非总是如此的，而是在早期宇宙夸克与反夸克的湮没过程中微弱反对称性的一种结果。GUT 应用于宇宙学之中，导致辉煌的成功。但也有严重的问题。例如，大量的原生有质量的磁单极子约为重质子的 10^{16} 倍，有待发现。然而，迄今为止，一个也没找到。

GUT 最重要的一个宇宙学蕴涵，一个有用的副产品，或许是阿兰·嘎斯 1981 年引入、被安德列·林德改进的、1982 年被安德赖斯·阿尔布雷特与保尔·斯坦哈德独立提出的暴胀模型。暴胀宇宙模型关键地依赖于自发对称性破缺的相变，GUT 预言相变发生的温度约 10^{27} K。虽然在许多宇宙学家看来，这模型是成功的。也有人发现它是个怪物，人们怎么能够认真看待一个宇宙学理论，它完全依赖于一个其关于质子衰变的主要预言得不到证实的大统一理论呢？有些物理学家与天文学家担心一拽而成科幻，不止限于超弦。两位天文学家写道：“[暴胀模型] 没有支持它的证据，而且，因为在数学上是美的，竟有许多物理学家就拥抱它，并且，选择忽略这些问题……宇宙学走进这样的前沿，在那里科学不再基于实验。做不可检验的预言，一旦跨越这界线，我们在物理世界后面就什么也没有了，进入一个形而上学的王国。” (Rothman Ellis 1987, 22)

有些物理学家以很不相同的方式处理宇宙学的量子特征。他们比 GUT 物理学更具思辨的想象力。把量子力学直接应用于整个宇宙，无需用引力的量子理论，可追溯到 30 年代末的爱丁顿与薛定谔。1939 年，薛定谔得到一个引人注目的结果：粒子在膨胀的宇宙中仅作为膨胀的结果被产生出来。但是，这个结果实际上被遗忘了。50 年代，美国的布拉斯·德韦特着手一个相关的以惠勒的某些思想为基础的研究计划。量子力学被放肆地外插到整个宇宙，使德韦特导出一个量子方程，一种宇宙的薛定谔方程，后来被称为惠勒-德韦特方程。可是，如何解释这方程、如何求得对



应于这独一无二的宇宙的唯一解，以及如何利用这方程作任何有用的事，一概不清楚。1982年，亚历山大·维伦金发展了爱德华·特里昂的一个早期提议，即宇宙的存在可理解为从一个量子真空涨落的“无”出来的一个量子隧道过程。维伦金的《宇宙从无中创生》必定使《物理快讯》的许多读者惊讶。于是，这种观念，把宇宙的创生视为真空涨落的一种结果，它激发了科学家与哲学家们的想象力，许多物理学家着手研究起来。不过，大多数物理学家并不被这疯狂思辨的迷人之处忽悠，认为也就是那么回事。

从1980年左右起，由于引力量子理论尚无定论，所以几个物理学家大胆地把量子引力模型用来说明宇宙从一种“无”状态的创生。这些模型中最出名的一个是詹姆士·哈特尔和斯蒂芬·霍金1983年提出的。两位物理学家从惠勒-德韦特方程出发，发展了一个宇宙波函数，他们发现这波函数是合法的，主张：它代表宇宙从一个有限的模糊量子变成存在的幅。按照霍金进路，不会有创生的问题，因为在 $t=0$ 的量子模糊中，时间与空间的观念是无意义的。因此，不会有奇点，不会有时空的边缘。宇宙自足地既没有创生也没有湮没。在其畅销书《时间简史》中，霍金称其观点具有超越科学王国的深邃的蕴涵：

随着描述事件的科学理论的成功，大多数人逐渐相信上帝允许宇宙按一组定律演化，并不破坏这定律去干预宇宙。可是，……仍然要上帝上好时钟机构的发条，并选择让她开始。一直以来宇宙有个开始，我们可以假定有一个创造者。但如果宇宙真正是完全自足的，没有[时间]边界或边缘，它就不会有开始也不会有终结：它会简单地存在，那么，创造者在那里呢？(Hawking 1981, 149)

——这也许是结束这一章的最好方式。

第四部分 回 顾

第二十八章 | 诺贝尔物理学

阿尔弗雷德·诺贝尔，瑞典工业家，因发明与生产甘油炸药发了财，他的遗愿是建立完整的诺贝尔奖基金。1900年，经过复杂的法律程序，这个遗愿以完成一部关于诺贝尔基金的法典而告终。第二年颁发第一批奖项。诺贝尔想要设立物理学、化学、生理学（或医学）、光学以及和平事业的年奖。他的遗嘱在执行细节方面十分模糊，所以，留给遗嘱执行人与后来的诺贝尔委员会去拟定细则，并建立一个组织机构。按照诺贝尔1895年11月27日的遗嘱，钱应该“以奖金每年颁发给那些在可见的将来最直接造福于人类的贡献者”。物理学奖将授予“在物理学领域做出最重要发现与发明的人”。此外，遗嘱强调无须考虑候选人的国籍，就是说，有资格获奖的人，绝不局限于他是否有斯堪的纳维亚血缘。（Crawford 1984, 221）

诺贝尔奖每年于诺贝尔的逝世日12月10日在斯德哥尔摩举行的仪式上发放。颁奖之前必经历一个严谨的程序。瑞典科学院，一个由不同部门科学家组成的社团，为每个科学委员会，包括物理学诺贝尔委员会，选出5名委员。有一个名额留给诺贝尔研究所物理学部的主席。他们是评奖过程的实权人物。物理委员会从大范围的提名人中收集提名，有些提名人是永久的，有些是根据特设的要求任命的。永久提名人包括：委员会与科学院的全



体成员，原先的诺贝尔奖得主，老资格的斯堪的纳维亚大学和类似机构的教授。特别任命的提名人包括选定的国外大学的教授与许多个别选择的科学家。

提名人可利用其权利向委员会提出候选人，然后，委员会考虑所有提案，并对其中的少数人准备详细的报告。委员会仔细斟酌该举荐谁作为候选人，但不受提案多寡的约束而行事。事实上，在1940年以前的大多数情形中，被提名最多的科学家反倒不被委员会推荐。例如，1910年，庞加莱有34人提名，普朗克有10人提名，但委员会决定举荐范德瓦尔斯，他只有1人提名。

虽然委员会的决定是提名系统的关键部分，但那不是事情的终结。委员会的提名需要被科学院物理学部的确认，提议最终被科学院全体会议讨论，那才是最后的决定。虽然科学院几乎总是遵循委员会的举荐的，但那不是被动的。例如，1908年，委员会推荐普朗克，而且科学院物理学部也认可了，可是，在科学院的全体会议上物理学家的候选人被多数人否决了，到头来，决定把这奖项授予法国物理学家加布里尔·李普曼，因为他发明了彩色摄影方法。4年以后，发生了一桩类似的情况。全体会议否决了由物理委员会与科学院物理学部推荐的凯末林·昂纳斯。可是，凯末林·昂纳斯在等了一年多之后仍得到了该奖项。

提名程序有时会出现这样的情况，即在所有的候选人中没有够资格的。在这样的情形中，奖项通常可以保留到第二年，到那时补充颁发。在前半个世纪中，这种情况是常有的。例如，1921年的奖项保留到1922年，那时授予爱因斯坦。一个奖项只能保留一年，如果仍没有授奖，那么，它将“永远保留”，即注销。这种情形物理奖项发生了5次：1916年，1934年，1940年，1941年与1942年。

从开始伊始，诺贝尔奖就是一个成功，人们逐渐认识到它是一切科学奖项中最有声誉的。诺贝尔奖所涉金额的巨大，是它的

地位以及围绕它的公开性的一个理由。1901 年奖金是 4 万美元，其购买力几乎是现有价值的 2 倍，相当于一名大学教授年工资的 3 倍。诺贝尔奖得主的选择，通常被物理学共同体的大部分承认是合理的，这才会不断为诺贝尔奖增添光彩。只有极少数情况，选择被舆论认为是“错误的”或“奇怪的”，就是说，跟大多数精英物理家的观点明显相左。同样，诺贝尔科学奖维持着其作为国际性奖金的信誉，明显不受政治与意识形态因素的影响。在这方面，科学奖与和平和文学奖有着巨大的差别。当然，政治不可避免会进入抉择过程，但奖项终究是由科学而不是政治驱动的。从诺贝尔机构建立之初起，它就认识到奖金不仅是对科学家个人而且也是对于科学家所在国的一种报答。奖金之间的竞争被视为国家之间的一种竞争，这是贯穿于整个 20 世纪的一种观点。在国家关系紧张与战争期间，奖金不可避免地跟国家情感相联系，就像奥林匹克比赛中赢得奖牌一样。诺贝尔物理学委员会总是（为了可理解的原因）担心：给一项第二年证明是错误的实验，或者，给一个既不可证实又不可证伪的理论授奖。例如，1903 年列邦因他的 N-射线被提名，1905 年布朗德罗特因他的“黑射线”被提名。可以设想：要是诺贝尔奖颁给了这一个或两个法国物理学家，那会对于诺贝尔奖的声誉造成何等的伤害。

诺贝尔遗嘱的含糊，导致了诺贝尔基金章程的含糊，为解释什么科学工作值得获奖方面创造了专横的可能性。例如，如何认真履行关于新近性的附加条款呢？在诺贝尔基金的章程中，这款是软性的，所指“直接的未来”，应该在这样的意义上加以理解，即“一项工作或发明，在遗嘱措辞下被考虑为一种奖赏，将阐述工作的最新结果；……较早期的工作或发明，只在它们的重要性原先没被展示的情形下，才能给予考虑”。虽然，包含于遗嘱中的判据已经被第一个奖项——当时伦琴的发明只有 4 年——软化了，一般地，在早期的几年里，新近性被认为是重要的。这



是为什么玻尔兹曼与开尔文不被考虑的一个重要原因。诺贝尔机构热切于不给在物理学长期服务的功臣、却要给新近发萌的特别工作授奖。这一直是一项正式的政策，但执行起来并不总是一贯的。明显的例子是：莱尼斯发现中微子比他得奖早 39 年；卡皮特查等了 40 年才得奖；钱德拉塞卡的主要工作 45 年之后才得奖。范弗列克的奖来得更迟是另一个例子。

另一个也是更严重的问题，是物理学的概念被理解得过于窄狭。“发明”与“造福人类”原先理解的意思是，应用物理学与技术中的进步可以随纯物理学的工作一道奖励。马可尼因发明无线电报于 1909 年获奖，以及瑞典工程师加斯塔夫·达伦因发明灯塔的自动照明于 1912 年获奖。虽然早期的物理学委员会看来同情于发明，可是它的同情不扩展到专利。1901 年，它决定：作为一条规则，专利发明不予考虑。自然，这一政策排斥了最成功的发明，从爱迪生到梅曼。自 1912 年起，没有奖项授予纯技术工作。人们发现，在头 20 年未获奖的提名候选人中有著名发明家：埃多阿德·布朗里（无线电报）、瓦尔德马·玻尔逊（弧发生器）、卡尔·冯林德（制冷机）、费丁纳德·冯泽佩林（飞船）、欧维勒与威尔伯·赖特（飞机）、迈克·普平（负载感应圈）和托马斯·爱迪生（灯泡、留声机以及许多别的东西）。“造福人类”的说法取决于具体如何定义。遵循学术科学的传统，委员会成立不久就决定：科学的基本进步，按定义，是造福人类的。就是说，功利考虑没有进入决策过程。这样一来，他们节省了洛伦兹对塞曼效应的说明的奖项，或者，后来施温格的量子色动力学，他们则说该理论在造福人类方面没有任何实际意义。

不给技术发明发放诺贝尔奖的政策并不意味着：被私人公司雇佣的科学家被阻止接受垂涎的奖金。就我们所知，从 20 年代起，私人工业的附属实验室越来越从事纯科学研究并在基本层面上对物理学的进步做出贡献。早年的例子是 1932 年的朗缪尔的

化学奖，和 1937 年的戴维逊的物理奖（见第 9 章）。表 28.1 列出的诺贝尔奖得主，其有价值的工作是或主要是在私人实验室做出的。1986 年诺贝尔奖是为了电子光学的开拓性工作和第一台电子显微镜的设计颁发的。这发明追溯到 30 年代早期，当时，柏林技术大学的马克思·克诺尔与厄恩斯特·鲁斯卡构造一台可操作的电子显微镜。鲁斯卡后来的大部分工作是在西门子与哈尔斯公司 1937 年建立的实验室做的，在那里鲁斯卡与他的同事 1939 年生产了第一台商用电子显微镜。1986 年的一半奖项，归于设计扫描隧道显微镜的海里奇·罗雷尔与格德·宾尼。罗雷尔于 1963 年、宾尼跟着于 1978 年加入 IBM 在瑞士的研究实验室。

表 28.1 诺贝尔奖授予的科学家中来自私人实验室或与之有关者

年份	科学家	工业机构
1937	C·J·戴维逊	AT&T/贝尔实验室
1956	J·巴丁, W·布拉顿, W·肖克利	AT&T/贝尔实验室
1977	P·W·安德逊	AT&T/贝尔实验室
1978	A·彭齐亚斯, R·威尔逊	AT&T/贝尔实验室
1986	E·鲁斯卡	西门子与哈尔斯公司
	H·罗雷尔, G·宾尼	AT&T/贝尔实验室
1987	K·A·缪勒, J·G·柏德诺兹	AT&T/贝尔实验室

原先，委员会对物理学定义比较广泛，强调物理学而非纯物理。天文物理学、气象学、地球物理学和物理化学都包括在内，但天文学除外。可是，20 年代看法有所变化，结果是非正式地排斥天文物理学与地球科学。某些交叉子领域或姐妹科学是否算作物理学，当然是政治事务而非原则性论据。因此，实践随时代而变迁。在早期年代，天文物理学定义为物理学的一部分，没



有奖项授予这领域。1967 年延误的贝特的授奖，是为他 1938 年关于恒星能量产生的理论，这是天文物理学的第一个奖。这一举措跟核与相对论天文学的急速发展相一致。新发展把天文学与物理学捆绑在一起了，并且，对什么构成诺贝尔奖的看法产生了影响。无论如何，1974 ~ 1993 年间不少于 7 个奖项授予更密切相关于天文学而非物理学的工作。同样应该注意的是：至少有一名物理学家马克思·德尔布鲁克接受了生物学奖。至于物理学与化学的交接，事情相当复杂。有一个原因是：化学有单独的诺贝尔奖，而天文学则没有。有一个例外，简·佩兰的 1926 年奖。物理奖从来都不授予在化学领域，包括物理化学或化学物理的工作。这可能是自然的——化学家被授予化学奖，物理学家被授予物理学奖——但这关系是不对称的。不去讨论物理学与化学之间的随时间变迁变化的关系，值得注意的是大量的诺贝尔化学奖授予了物理学家，或者，其工作按常规应属于物理学的科学家。表 28.2 中列出的奖项也可以或更好地归并于物理学的范畴。放射性、同位素、分子的结构以及化学元素的发现，传统上被视为属于化学，这可以说明某些奖项的类属并不明晰。最著名的例子或许是授予卢瑟福的奖项，他被认为他在放射性方面的工作严格地是物理的，他的化学声誉不高。在放射性与核化学领域中，许多发明者的交叉学科性质，偶尔引发一些有争议的决定。有一个涉及核裂变的发现，早在 1941 年就被化学委员会考察。1945 年决定把 1944 年的化学奖授予哈恩一人，而斯特拉斯曼、迈特勒与弗里什则没有通过。迈特勒与弗里什对柏林实验做出了正确说明，被提名授予物理学奖，但遭委员会否决，说他们的说明凭好运的猜测过多。如果要给说明授奖，那么，荣誉宁可给予未被提名的玻尔。

表 28.2 化学奖授予物理学家或从事物理学本质研究的人

年份	诺贝尔奖得主	诺贝尔奖工作	诺贝尔奖得主背景
1908	欧内斯特·卢瑟福	放射性衰变	物理学
1911	玛丽·居里	镭与钋的发现	物理学
1920	沃尔特·能斯脱	化学热力学	物理化学
1921	弗勒德里克·索迪	放射性, 同位素	物理化学
1922	弗朗西斯·阿斯顿	质谱仪	物理学
1932	伊尔文·朗缪尔	表面化学	物理化学
1934	哈罗尔德·乌瑞	氘	化学物理
1935	弗雷德里克·约里奥 伊瑞妮·约里奥-居里	人工放射性	物理学 物理学
1936	彼特·德拜	分子结构	物理学
1944	奥托·哈恩	裂变的发现	物理化学
1949	威廉·吉奥克	低温方法	物理化学
1951	埃德文·麦克米伦 格伦·西伯格	超铀元素	物理学 核化学
1960	威拉德·里比	C-14 定时法	核化学
1968	拉斯·昂萨格	不可逆热力学	物理化学
1971	格尔哈德·赫兹伯格	分子结构	物理学
1977	伊里亚·普里高津	耗散结构	物理化学

有时, 科学委员会的成员对于诺贝尔政策以及鼓励他们所喜爱的物理研究很有影响力。20 年代, 委员会主要理论家卡尔·欧辛兴趣逐渐转向理论物理学, 他的兴趣转移标志着诺贝尔奖对旧实验物理学摒弃。物理化学家斯范特·阿亨尼尔斯对于早期化学



与物理学诺贝尔奖的决定曾施加强有力的影响。他利用他的地位突出原子理论，这有助于给卢瑟福与普朗克授奖。阿亨尼尔斯也成功地长期阻止能斯脱的化学奖，在这方面，主要是人而非科学的因素。

一项值得获诺贝尔奖的工作必须是一项“发现或发明”。在原先看来这意味着纯理论工作是不够获诺贝尔奖资格的。在头 20 多年里，物理学委员会由实验家主宰，决定给予高精度的实验工作优惠。这反映当时瑞典物理学一般的实验倾向。在 1890 ~ 1920 年间，从斯德哥尔摩、拉德与乌普萨拉各国立大学毕业的 77 名物理学博士中，66 篇学位论文主要是实验的，只有 10 篇是理论的。如果理论未被直接的实验证实，那么，物理委员会是不愿认真考虑理论物理的。理论物理与数学物理常被视为是“思辨的”。一名瑞典物理学家在 1918 年一篇关于爱因斯坦相对论的评论文章中，表达了科学的理想。他写道：这是一种为其自身利益与吸引青年人而发展起来的理论。但是，“较老的人，他们生活于旧理论之中，……更容易只满足于关于事实的知识，即实验证实了的理论。……被这些抽象理论带走是一种简单而无教养的情趣。”（Elzinga 1995, 84）大多数诺贝尔委员，不论他们年龄如何，都是“老派人物”。众所周知，爱因斯坦并不是因相对论，而是因他对光电效应的 1905 年的说明而获奖；而这奖是授予他关于正确的光电效应的预言，而不是预言所赖以为基础的光子理论：精确地说，“为了他对于理论物理的贡献，特别为他发明了光电效应的定律”——注意那不可思议的“发明”一词。直到 1922 年，爱因斯坦被提名不少于 62 次，只有一次是特别提到光电效应的。撰写关于爱因斯坦相对论报告的瑞典物理学家得出的结论是：接受是“一个信仰问题”；另一个委员断言：“诺贝尔把这样的猜测看作是他的授奖对象，是极不可能的。”（Friedman 1981, 795）自那以后，委员会开始以一种较喜欢的态度来评价理论工作，特

别是1923年选举欧辛进入委员会之后。但是，一般的态度仍然是保守的。对于跟实验工作联系不紧密的理论工作仍持不信赖态度。当海森伯和薛定谔被提名为1929年奖的候选人时，委员会认为：量子力学“尚未产生更基本自然的任何新发现”。在其1933年对狄拉克的评价上，欧辛的结论是：迄今为止，这位年轻的理论家尚未做出任何“真正巨大创新的工作”。（Kragh 1990，116）反正都一样，三位量子先驱都得了奖。

表28.3列出1901~1998年的诺贝尔物理学获奖名单。有160名科学家单独地或分享地接受了物理学奖。160名受奖人中，只有两人（1.3%）是妇女，即玛利·居里与玛利亚·乔佩特-梅耶夫人。由于她们都只是1/4个奖项，所以，妇女的总奖项数是半个。同样，只有两名受奖人来自第三世界；如果钱德拉塞卡包括在内，就是3人。非洲与拉丁美洲的物理学家从未得奖。按其获奖工作的时间计算，大多数诺贝尔奖得主是欧洲人（54.4%）或美国人（41.9%）。到1940年，德国与英国的物理学家得奖最多（均为22%），而到1970年，美国物理学家得奖者比这两个国家物理学家得奖者之和还多。

表 28.3 诺贝尔物理学奖获奖名单（1901~1998）

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1901	W·伦琴	德国	X射线	1895年	E
1902	P·塞曼	荷兰	塞曼效应	1896年	E
	H·洛伦兹	荷兰	—	1896年	T
1903	A·贝克勒尔	法国	放射性	1896年	E
	P·居里	法国	—	约1898年	E
	M·居里	法国	—	约1898年	E
1904	瑞利勋爵	英国	氩	1895年	E



续表 1

年份	姓名	国家	主题	发现年份
1905	P·勒纳德	德国	阴极射线	约 1902 年 E
1906	J·汤姆孙	英国	电子	1897 年 E
1907	A·迈克耳孙	美国	干扰测量术	约 1890 年 E
1908	Q·李普曼	法国	彩色摄影术	约 1895 年 E
1909	G·马克尼	意大利	无线电报	约 1895 年 E
	F·布劳恩	德国	—	约 1897 年 E
1910	J·范德瓦尔斯	荷兰	气体与液体	1873 年 T
1911	W·维恩	德国	热辐射	1896 年 T
1912	N·G·达伦	瑞典	自动调节器	1907 年 E
1913	H·K·昂尼斯	荷兰	低温	约 1908 年 E
1914	M·冯劳厄	德国	X 射线衍射	1912 年 E/T
1915	W·H·布拉格	英国	晶体结构	1912 年 E
	W·L·布拉格	英国	—	
1917	C·巴克拉	英国	二级 X 射线	1905 年 E
1918	M·普朗克	德国	量子理论	1900 年 T
1919	J·斯塔克	德国	斯塔克效应	1913 年 E
1920	C-E·纪尧姆	法国	镍钢合金	约 1895 年 E
1921	A·爱因斯坦	瑞士	光电效应	1905 年 T
1922	N·玻尔	丹麦	原子理论	1913 年 T
1923	R·密立根	美国	电子电荷与 光电效应	1911~1915 年 E
1924	K·西格巴恩	瑞典	光谱学	约 1922 年 E

续表 2

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1925	J·弗朗克	德国	电子-原子碰撞	1915 年	E
	G·赫兹	德国	—		
1926	J·佩兰	法国	悬体的平衡	1908 年	E
1927	A·康普顿	美国	康普顿效应	1923 年	E
	C·威尔逊	英国	云室	1911 年	E
1928	O·理查逊	英国	热离子现象	约 1910 年	T
1929	L·德布洛意	法国	电子的波动性	1923 年	T
1930	C·拉曼	印度	拉曼效应	1928 年	E
1932	W·海森伯	德国	量子力学	1925 年	T
1933	P·狄拉克	英国	量子力学	1925 ~ 1928 年	T
	E·薛定谔	奥地利	波动力学	1926 年	T
1935	J·查德威克	英国	中子	1932 年	E
1936	V·赫斯	奥地利	宇宙辐射	约 1911 年	E
	C·安德森	美国	正子	1932 年	E
1937	C·戴维逊	美国	电子的波动性	1927 年	E
	G·汤姆孙	英国	—	1927 年	E
1938	E·费米	意大利	中子核反应	1934 年	E
1939	E·劳伦斯	美国	回旋加速器	1932 年	E
1943	O·斯特拉	德国	分子束方法	约 1920 年	E
1944	I·拉比	美国	磁共振法	30 年代	E
1945	W·泡利	奥地利	不相容原理	1925 年	T
1946	P·布里奇曼	美国	高压物理学	约 1930 年	E



续表 3

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1947	E·阿普顿	英国	阿普里顿层	1926 年	E
1948	P·布莱克特	英国	云室物理学	约 1930 年	E
1949	H·汤川秀树	日本	介子理论	1935 年	T
1950	C·鲍维尔	英国	介子的发现	1947 年	E
1951	J·科克罗夫特	英国	高压加速器	1932 年	E
	E·沃尔顿	英国	—		
1952	F·布洛赫	美国	核磁学	约 1945 年	E/T
	E·珀塞尔	美国	—		E
1953	F·泽尔尼克	荷兰	位相对比法	约 1932 年	E
1954	M·玻恩	德国	量子力学	1926 年	T
	W·博特	德国	符合法	1924 年	E
1955	W·拉姆	美国	氢的拉姆效应	1947 年	E
	P·库什	美国	电子的磁矩	1947 年	E
1956	J·巴丁	美国	晶体管效应	1948 年	E
	W·布拉顿	美国	—		
	W·肖克利	美国	连接晶体管	1949 年	E
1957	杨振宁	美国	宇称不守恒	1957 年	T
	李政道	美国	—		
1958	P·切伦科夫	前苏联	切伦科夫效应	1935 年	E
	I·弗朗克	前苏联	—	1937 年	T
	I·塔姆	前苏联	—		T

续表 4

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1959	O·张伯伦	美国	反质子	1955 年	E
	E·塞格雷	美国	—		
1960	D·格拉塞	美国	气泡室	1952 年	E
1961	R·霍夫斯塔特	美国	电子被核 散射	约 1955 年	E
	R·穆斯堡尔	德国	穆斯堡尔 效应	1958 年	E
1962	L·朗道	前苏联	液氦理论	约 1941 年	T
1963	E·维格纳	美国	对称性原理	约 1930 年	T
	M·梅耶夫人	美国	分子的壳 结构	1948 年	T
	J·H·D·J·H ·詹森	德国	—	1948 年	T
1964	C·汤斯	美国	量子电子学 (激光)	1954 年	E
	N·巴索夫	前苏联	—	1955 年	E
	A·普洛霍罗夫	前苏联	—		E
1965	R·费曼	美国	量子电动力学	1949 年	T
	J·施温格	美国	—	1948 年	T
	朝永振一郎	日本	—	1943 年	T
1966	A·卡斯特勒	法国	双共振	1950 年	E
1967	H·贝特	美国	恒星能量的 产生	1938 年	T



续表 5

年份	姓名	国家	主题	发现年份
1968	L·阿尔瓦雷兹	美国	基本粒子	约 1962 年 E
1969	M·盖尔曼	美国	基本粒子理论	1962 ~ 1964 T
1970	H·阿尔芬	瑞典	电磁流体动力学	约 1948 年 T
	L·尼尔	法国	磁学模型	1932 ~ 1948 年 T
1971	D·加博尔	英国	全息	1948 年 E
1972	L·库柏	美国	超导理论	1957 年 T
	J·施里弗	美国	—	
	J·巴丁	美国	—	
1973	江崎玲于奈	日本	半导体隧道	1957 年 E
	I·贾埃弗	美国	—	
	B·约瑟夫森	英国	约瑟夫森效应	1962 年 T
1974	A·赫威斯	英国	脉动星	1967 年 E
	M·赖尔	英国	射电天文学技术	1954 年 E
1975	A·玻尔	丹麦	核的集体模型	1953 年 T
	B·莫特爾遜	美国	—	
	J·雷恩沃瓦特	美国	—	1950 年 T
1976	B·里克特	美国	J/Ø 粒子	1974 年 E
	丁肇中	美国	—	E

续表 6

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1977	J·范弗列克	美国	磁学理论	30 年代	T
	N·莫特	英国	金属理论	约 1936 年	T
	P·安德逊	美国	固体理论	约 1960 年	T
1978	P·卡皮查	前苏联	低温物理学	约 1940 年	E
	A·彭齐亚斯	美国	3K 背景辐射	1965 年	E
	R·威尔逊	美国	—		
1979	S·温伯格	美国	电弱理论	1967 年	T
	A·萨拉姆	巴基斯坦	——	1967 年	T
	S·格拉肖	美国	—	1961 年	T
1980	J·克罗宁	美国	CP 不守恒	1964 年	E
	V·菲奇	美国	—		
1981	K·西格班	瑞典	电子谱仪	50 年代	E
	N·布洛姆伯根	荷兰	激光谱仪	1956 年	E
	A·肖洛	美国	—	约 1956 年	E
1982	K·威尔逊	美国	临界现象	1970 年	T
1983	W·福勒	美国	核天文学	约 1960 年	T
	S·钱德拉塞卡	印度	恒星结构	1934 ~ 1939 年	T
1984	C·鲁比亚	意大利	W 与 Z 的发现	1983 年	E
	S·范德梅尔	荷兰	—		
1985	K·冯克里津	德国	量子霍尔效应	1980 年	E
1986	H·鲁斯卡	德国	电子显微镜	30 年代	E



续表 7

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
	H·罗雷尔	瑞士	扫描隧道显微镜	1978 年	E
	G·比尼格	德国	—		
1987	K·A·缪勒	瑞士	高温超导性	1986 年	E
	G·伯德诺兹	德国	—		
1988	L·莱德曼	美国	μ 中微子	1962 年	E
	M·施瓦兹	美国	—		
	J·斯坦伯格	美国	—		
1989	N·拉姆齐	美国	原子钟	50 年代	E
	H·德默尔特	德国	离子阱技术	1973 年	E
	W·保尔	德国	—	50 年代	E
1990	R·泰勒	美国	深度非弹性散射	60 年代	E
	H·肯德尔	美国	—		
	J·弗里德曼	美国	—		
1991	P-G·德热纳	法国	液晶	1974 年	E
1992	G·夏帕克	法国	探测装置	70 年代	E
1993	R·赫尔斯	美国	双脉动星的发现	1974 年	E
	J·泰勒	美国	—		
1994	B·布罗克豪斯	加拿大	中子谱仪	约 1960 年	E
	C·沙尔	美国	—		

续表 8

年份	姓名	国家	主题	发现年份	
1995	M·佩尔	美国	τ 轻子的发现	1974 年	E
	F·莱因斯	美国	中微子的发现	1956 年	E
1996	R·李	美国	氦-3 超流性	1972 年	E
	R·里查逊	美国	—		
	D·奥谢罗夫	美国	—		
1997	朱棣文	美国	原子激光冷却	80 年代	E
	W·菲利普斯	美国	—		
	C·科恩-塔努基	法国	—		
1998	R·劳克林	美国	电子亚粒子	1982 年	T
	H·斯特默	德国	—		E
	崔琦	美国	—		E

注：授奖年份指颁奖年份，非得主受奖年份。字母“E”与“T”分别指工作主要是实验的（T）还是理论的（E）。国家指获奖工作期间，或扩展到早期工作的所在国。

第二十九章 | 百年物理学回顾

成长与进步

19 世纪常常被标榜为科学的世纪。在这一世纪中，现代科学的涌现确实比一小群哲学家的智力活跃得多；在这个世纪中，科学的国家意识较强，国际性程度较小。也就在这一时期，科学常被证明对一般社会的价值。然而，接下来的一个世纪，甚至更有理由称作是科学的世纪，因为在这期间，科学变成为不仅主宰知识界，而且，主宰着社会、经济与军事界中的大部分生活。在 19 世纪中起飞的科学是完全确立的，准备好了为 20 世纪行动，然后，开始了整个人类历史从未有过的一个急速发展过程。首先是数量上的增长，表征了科学在第二个千年的最后一个世纪中的发展。当然，物理学不是经历了令人瞩目地成长的唯一科学。一般说来，科学的所有分支都在 20 世纪中爆炸性成长，尽管各呈相当不同的生长模式。例如，在最后的二三十年里，物理学达到稳定，而生物科学与环境科学则一直处于持续的生长期。

1900 年前后，如我们在第 2 章中所看到，物理学是一个茂盛却很小的事业。学术物理学家总数不到 1 500 人。旧的德国的物

理学会约 350 名会员，刚成立的美国物理学会会员不到 100 人。物理出版物的数量，据大的文摘所报道的，约为 2 400 篇。20 世纪 90 年代，物理学世界有了实质的扩大。两个物理学会会员增加到 25 000（德国）与 40 000（美国）。在《物理文摘》上出现的研究论文接近 20 万篇。全世界的物理学家人数超过 15 万人。在不到一个世纪的时间内，人数与论文数都整整增长近 100 倍。无疑，物理学研究与教学的经费就增长更多了。

物理学新的组织模式和新的从事物理学的方式，开初是慢慢的，然后在第一次世界大战结束后以起飞式的速度跟随物理学形成和发展。这种变化在 20 年代末已经明朗化，实际的分水岭是第二次世界大战，源于战争及其后果在一门已证明对军事特别有用的科学中所引发的巨大变化。战后的世代更替，以及对于工具主义与实用主义思维模式的转向的一个结果是：哲学失去了它在物理学中的地位。许多老一辈的物理学家对哲学问题有一种深厚的兴趣。在他们的创新工作中，有时哲学具有指导的意义，或者，他们会以哲学家的态度讨论新物理学中的蕴涵。对于普朗克、玻尔、薛定谔、海森伯、爱因斯坦、爱丁顿和他们的许多同事来说，哲学是物理学的一个重要方面。而战后物理学的领导人很少关注哲学，或者，对这领域止于皮毛知识。到 60 年代，随着玻尔与薛定谔的去世，物理学家-哲学家曾有过骄傲与生动的传统终止了。

1945 年以后，物理学开始向着大科学纪元全速挺进，虽然我们不知道在高能物理学中发现的那种有魅力的大科学不是，也从来不是整体物理学的典型。然而，甚至小科学的物理学也被这潮流所影响。其一个结果是：作为知识产生单位的个体科学家向集体、团队或合作的移位。不论是文献计量水平，还是个体署名论文向群体署名论文的移位，变化都是明显的不可避免的群体化趋势——不可避免不仅因为仪器规格与复杂性的增长，而且也因为



物理学多领域超学科性的增长——这一切并不意味着伟大个体的日子已经完结。真正的创造性仍在于个体科学家的天才。这一断言已被战后物理学的历史所支持，其程度不亚于更英雄的战前物理学，那里有着从普朗克与爱因斯坦到玻尔与汤川的天才群。

贯穿 20 世纪，物理学继续是一门真正的国际科学。或者，世界主义是一个较好的词汇，因为这是它的特点，即：许多物理学家不辞劳苦从一个国家流动到另一个国家，从一座城市流动到另一座城市，目的就是在最可能好的条件下工作，不大注意国家的地域。我们可以希望 20 世纪末的物理学比它原先所拥有的世界主义多得多。但实际上，青年的物理学家总是自由地（或多或少）从一国到另一国，并把他们的科学看作是超国家的。但是，在社会学意义上，把物理学特征化为国际的，会是一种夸张。尽管在世界富有的北方与所谓的第三世界之间发生了巨大的政治变化，物理学仍然完全被欧洲与北美洲所主宰。原先的殖民地已经变成了独立的国家，而且，有些第三世界国家（特别在东亚与南美）已从发展中向发达国家转变。这一事实几乎没有反映在物理学的国际组成上。1900 年，在巴黎的物理学世界大会上，80 篇论文只有 2 篇是由后来称为第三世界提供的。如果相应的大会在 1995 年召开（如其所是地不可想象），那么，不会有更高的比例。

关于第三世界存在的比例问题，也存在于性别方面。在 1900 年，物理学几乎全由男性主宰，科学的所有分支，事实上一切公众的与职业的生活，也是这样。90 年以后，女性物理学家的人数有相当的增加，而且，相对地比男性增长得快些。但是，这个增加没有产生什么变化。在世界范围内，女性比例仍低于 10%。这个数字低于生物学与化学科学中的相应数字。此外，女性很少进入物理学的精英行列。在前沿研究中，她们比从她们在教席比例中所期待的更少。玛丽·居里仍然是 20 世纪——确切说是有史以来——最杰出的女性物理学家。

大体上，世纪之初的物理学由德国、英国和法国主宰（详见第2章）。跟法国不一样，直到30年代德国连续地起着领导作用，英国从未停止过对世界物理学作出重大贡献。到30年代，如它在其他几个科学，特别在技术发展中一样，美国已经变成了物理学的世界强国。尽管有一个强大的前苏联物理学共同体的崛起，但在战后的几十年里，美国物理学拥有一种霸主地位。事实上，20世纪物理学的最瞩目的变化，特别是跟前一世纪相比较，是产生了美国物理学的主宰。在最后的1/4个世纪，这种主宰地位明显削弱。在某种程度上，欧洲重返舞台。但美国无疑仍然是世界上物理学的领导国家。另一方面，由于交通与电讯的先进技术，物理学增长的超国家性与世界主义性使得谈论国家的物理学变得不太相干了。记得在1900年的巴黎大会只有两名美国代表——当时横越大西洋旅行既缓慢又昂贵。记得由于跟欧洲通讯的延误，美国物理学家进入1925年之后的量子革命也同样被延误——德国物理期刊要耗费时间才能抵达美国。在一个喷气交通、全球电话、电子邮件与因特网服务是举手之劳的时代里，从事物理学与追随前沿研究的条件已经变化了。

常说科学与民主同行，科学只在民主政治条件下茁壮成长。这说法并未获得20世纪物理学历史的太多支持。不论民主与科学的发展之间有什么关系，如果有，那也不是一种简单的关系。的确，德国物理学在1933年以后沉沦，但那几乎不是由于纳粹专制扼杀了被认为是科学健康发展必要条件的、自由的民主精神。有那么多物理学精英逃离德国，而这种沉沦却不算厉害，真令人诧异。还有，如我们在第十六章注意到的，意大利物理学在法西斯专制时期经历了它的黄金时代。再有，尽管30年代的清洗以及战争期间人力与资源损失得可怕，前苏联物理学在斯大林时代及以后，在数量与质量两方面，持续处于一种高水平。

20世纪的物理学不仅在人员、组织、仪器、研究的产出与经



济支持等方面都增长了，而且，在科学上也是进步了。就是说，产生了关于自然的大量新知识。在知识的质增长与量增长之间不存在一种自动关系。事实上，在 20 世纪很难找到这两者之间的任何特别的关联。值得注意的是：大多数人或许挑选出相对论与量子力学作为本世纪最深刻与最广泛的概念发明，它们不是靠大规模的经济支持或昂贵的实验而涌现出来的。这不是说两者之间就不存在一点关系了，因为似乎有理由假设：有兴趣的发现最可能在一个范围大、投资好的物理学共同体而不是在一个范围小、投资差的共同体中实现。

知识的进步以不同的形式，独特的状态呈现。一类可以称之为进步的扩展模式，它是在一个已开辟的成形的自然领域内扩展知识基础，通过更精密的测量，或靠新工具在特定领域的新广度方面的考察取得。在其广泛意义上，光谱学是进步扩展型的首要例子。固体物理学也一样。原先局限于金属物理学，固体物理学扩展成覆盖越来越多的方面，并且，最后覆盖了现代的、很广泛的凝聚态物理学领域。扩展型进步常常是低规格的，因为它被认为只是产生新的资料和工具性的知识；然而，实际上它也是一个导致概念质变的有效能的机制。本书描述过许多这方面的例子。例如，19 世纪 90 年代黑体辐射的仔细测量，以及 50 年代望远镜扩展到包括无线电波。

另一类进步，打开新的窗口，通过它们可以研究自然的秘密，这就是，发现新质的现象。在这方面，现代物理学也是极其成功的，特别在 1940 年以前。一般称之为的现代物理学多亏其存在才有这些发现。其中最早与最重要的是 X 射线与放射性。最后，第三类进步，实质上是理论的。那就是引入对于得到的知识给予新意义的构架与原理。这些原理不仅是把当初似乎不关联的知识体系化秩序化。它们也是富有启发功能的，并且，贯穿 20 世纪，它们被理论家们捧为最高规格的进步。

进步，不论这个词汇的意义如何，已经是 20 世纪物理学一个跟其生长一样突出的特点了。虽然科学的进步一直是不均匀的，不同领域的进步各不一样。在一个广阔领域中，它的发生是连续的、大体上是累积的，而且，常常是急剧的。20 世纪 90 年代的物理学家，比 19 世纪 90 年代的物理学家，更广泛地知道了自然是怎样运作的。挑一个领域来说吧，关于原子、亚原子结构以及保持基本粒子在一起的力，这整个知识领域在 20 世纪是丰收了。而在 19 世纪 90 年代以前，关于物质的亚原子构成，人们实际上完全无知，或者，充其量懂一点的话，那也是化学家而不是物理学家。关于进步的问题值得一提，不是因为物理学家对于物质有什么疑虑，而是因为对于科学进步的实在性提出质疑变成了某些社会学与哲学的一种时尚。有些学者严重地否认能够有意义地谈论科学的进步。对于这些笨蛋简单的回答就是：看看现代物理学某个领域的发展，比方说，金属的导电性，或者，恒星能量的产生。把 20 世纪 90 年代这些知识的状况跟一百年前的知识状况作一比较。有些关于科学知识的一致性，社会学家宣称：业已证明“前沿研究的科学家不可能通过更好的实验、更多的知识、更进步的理论，或者，更清晰的思想解决他们的不一致性。”（Collins and Pinch 1992, 144）或许无须指出：这种奇谈谬论得不到 20 世纪物理学历史的支持，在那里，不一致性以这种准确方式常规地解决了。

物理学与其他科学

20 世纪前半叶，物理学作为最具魅力的科学涌现出来。尽管近些年来遇到了麻烦，它也许仍然具有这一地位。公众把伟大的物理学家看作是跟上帝或自然有直接联系的巫师。最让公众着迷的、伟大的著名思想家，当然是爱因斯坦，但他的后面还有其他



的著名物理学家，诸如玻尔、费曼、盖尔曼与霍金。伟大而梦幻般的理论家代表着令人着迷的方面。另一个较为黑暗的方面就是物理的威力，原子弹的蘑菇云为最戏剧性的表征。物理学似乎覆盖着整个领域，从深奥的量子哲学到诸如雷达与激光等技术装置。就公众着迷而言，没有别的科学可与物理学相竞争了。最近有本书给历史上最有影响的 100 名科学家排名，其中包括心理学家与社会学家（Simmons 1997）。虽然这种排名不能看得太认真——人们怎么能够把阿基米德跟奥本海默作有意义的比较呢？——看看作者是怎样高度评价物理学家，是有趣的。表上排名前三名（牛顿、爱因斯坦与玻尔）全是物理学家，25 名最有影响的科学家中 12 名是物理学家，其中 8 名属于 20 世纪。

在 20 世纪的前 3/4 世纪中，物理学对所有科学的主宰地位，可从物理学对其他诸如天文学、化学、地质学与生物学等经典科学的影响中彰显出来。主要通过三条渠道发生这种影响。其中最直接的是物理学家向科学的其他学科的迁移。在某些情形中，青年物理学家成功地迁移到这一门或另一门科学之中，或在那里做出了重要工作。尽管如此，也存在反向迁移的情况。另一种影响的渠道是：在那些与传统无关或甚至敌视物理学工作态度的科学中，采用物理学的思维模式。通过由实验物理学提供的工具与技术对非物理科学的影响不是不重要的。在化学的情形中，它在许多方面是物理学的姊妹学科，这条渠道不是新特色。这在拉瓦锡时代是众所周知的，它是 19 世纪 80 年代晚期涌现出来的物理化学的一个组成部分。但是，在 20 世纪中，化学变得甚至更紧密地依赖于源于物理学的新实验方法了，诸如 X 射线与电子散射、核磁共振、光谱仪以及质谱仪。在更基本的层面上，化学甚至被威胁成为物理学的一个分支，即有些原子与量子物理学家（包括玻恩与狄拉克）宣称化学只是应用量子力学。在量子力学问世前 5 年，玻恩写道：“我们没有深入到化学的广阔地域，”然而，

“我们走得够远了以致看到了前方远处的、在物理学能够将其定律作用于它的姊妹科学之前所必须跨越的路径。”（Nye 1993, 229）由于20年代末量子化学——首先由物理学家而不是由化学家发展——的涌出，玻恩的物理帝国希望（以及许多化学家的噩梦）似乎变成了现实。可是，不久证明：没有化学家的经验输入，甚至连一个简单的分子都不能从量子物理学演绎出来。反正都一样，理论化学家深深受到量子力学（以及物理学其他分支）的影响，在某种程度上，这领域可视为“应用物理学”。天文物理学的发展，以及天文科学中的种种基本变化，是跟随物理学暴风骤雨式的发展而来的，我们前面已经讨论过了（第十二与二十三章）。

在地质学的情形中，影响不是直接的。然而，它却导致这门科学的重新定向，从作为自然历史学的传统地位转向一门以物理科学的标准为范型并利用物理学的工具与推理方式的、新的“地球科学”。地质科学的一部分，如地球物理学与地震学，在20世纪早期，特别在德国物理学家埃米尔·维彻特的影响下，已经被“物理化了”。随着60年代大地板块构造革命，物理动因的变换已经完成。

物理学对于生物学的影响有着类似的经历。在这里，20世纪30年代分子生物学的问世，标志物理的与还原的思想进一步入侵到了生命科学之中。这是不足为奇的，因为分子生物学的早期领导人是作为物理学家训练出来的，这包括马克思·德尔布鲁克与沃尔特·埃尔萨瑟，他俩在进入生物学之前都对物理学作过有价值的贡献（以及，埃尔萨瑟对地球科学做过重要工作）。发现双螺旋结构的弗朗西斯·克里克1938年毕业于物理系，只在战后才转向生物学，部分受了薛定谔1944年《生命是什么》一书的激励。1953年DNA结构的阐释，广泛地被视为现代生物学最重要的发现。在很大程度上，它是由另一个由物理学家转为生物学



家的毛里斯·维尔金斯对 X 射线衍射图像所作分析的结果。20 世纪生物学的一般趋势，以及具体地分子生物学，极大地受到物理学以及从这门科学接过来的还原论思想激励。1966 年，克里克写道：“现代生物学的最终目标事实上是用物理学与化学来说明一切生物学。这样做存在一个好理由。由于 20 年代中期物理学的革命为化学与物理学的相关部分准备了一个坚实的理论基础……而且，认识到我们在原子水平上的知识确保物理学家与化学家向生物学的大幅度流入。”（Olby 1994, 425）最最重要的是，可以毫不夸张地说，20 世纪科学的整体步调与方向严重地受到物理学发展的影响。20 世纪科学的一个最重要的结果是：似乎出现了所谓的物理学基本定律的无限有效性。19 世纪 90 年代，热力学第二定律能否应用于细胞还是一个有争议的议题，更普遍地，物理学定律能否应用于自然中每一个地方与每一时刻，这些定律是否有着如此广泛的有效领域，是远远不明确的。但是，多年的研究似乎证实事实确实如此。不仅这些定律应用于生命机体，而且应用于宇宙最遥远的部分、恒星内部以及几百亿年前甚早期宇宙的超稠密状态。一切为世界分离层级提供分离定律的努力全归失败。20 世纪末的物理学家可以有某种信心地（不要跟肯定地相混淆）说：他们知道了基本的定律，而且这些定律应用于一切自然，这并不意味着自然的一切都被物理学所证明，也不意味着其他的科学都归结于物理学。但是，它意味着：自然中没有这样的现象，其说明所要求的原理跟物理学家所接受的定律相矛盾。（这样的现象可能出现，但迄今为止，尚未出现。因此，我们没有理由假设它们会出现。）所以，无需提出任何一种简单的还原论，存在一种感觉，那就是，物理学可以说是一切科学中最基本的与最通用的科学。这种“物理帝国”的观点远远不是新玩意，但是，在 20 世纪它被充实了，并且，已经成为一种信念与自夸。

保守的革命

如前所述，物理学在物理学之外所起的作用在 20 世纪已经改变了，它把科学变成了后工业社会的一个被整合了的部分。这一点以及它对物理学的组织与性能产生的效应，或许是所发生的最大变化。当我们向其他方面眺望时，相当清楚地看到：一般的图像一直是既连续又间断的，既有永恒性又有革命的变化。在本体水平上，变化确实是深刻的，主要是量子革命的结果——按照菲力普·安德逊的说法，“一种脱节，对许多物理学家来说，一种在心灵上尚未治愈的脱节。”（Anderson 1995, 2018）量子力学给我们提供跟直接被感知与被测量的东西一点都不相似的基本结构。我们现在对于世界是什么组成的信念，是对来自 19 世纪 90 年代的信念的遥远呼唤。当时，把物质想象成微小砌块的集合体仍有意义。真空已经变成了除“无”之外的任何东西，充满生命、活性与性质。这正是新物理学的一个重要的结果。但它本身却没有撼动 1900 年一个习惯于把真空想象成充斥着以太的物理学家。

在某些方面，20 世纪的物理学与物理学家没有太多改变。例如，游戏的规则——研究的方法论——20 世纪 90 年代与 19 世纪 90 年代是很相似的。如何评价一个断言，什么算得上一个好的实验、检验程序，数学在物理推理中的功能，以及思想实验的利用——这些以及方法论的别的议题基本保持不变。虽然，20 世纪 70 年代以后，计算机实验加入了现代物理学的方法行列。如果青年的卢瑟福与索末菲尔德被时空机器弹射到我们的世界中来，他们在理解物理学的理论与实验的许多事物方面，会有巨大的、仍可克服的麻烦；他们会容易地鉴赏现代物理学的方法，它们是如此地贴近于自己时代中所用的方法。关于物理学家的梦想与最终



抱负，存在相同的连续性。统一的理想、数学的美以及作为物理学真理的一般原理，都不是 20 世纪末物理学的产物。普朗克与米虽然不会理解 GUT 理论的数学与物理学，他们仍会完全赞赏这类现代理论的一般观念与目标。

我不想断言物理学的方法一直没有变化，只是说，广泛不同于 19 世纪的方法与观念是相对地不重要。如在第 27 章中所看到的，高能物理学的一些特定的方面（如超弦理论与暴胀理论）离实验相距如此之遥，以致不可能经验地检验。因此，数学的一致性与美的论据变成了展示这些理论“真理”的方法。这肯定是对公认的科学方法论的一种偏离，并且，这里有一种潜在的危险。然而，情况不应过分戏剧化。因为，这只是理论物理的一个小角落的一种趋势，它不影响 99% 的物理学，在那里理论与实验是健康地接触的。此外，它不是一个新问题。19 世纪的以太涡弦理论，20 世纪初的大统一理论，30 年代爱丁顿的基本理论，以及大多数战后的量子引力理论，都利用了不依赖于实验的标准。超弦理论家之前的许多年，有物理学家为纯理性辩护。例如，在 1932 年的一个著名陈述中，爱因斯坦说：“自然是简单的、可思议的数学观念的实现。……[以及] 我们利用纯数学的构造物，发现那些概念以及它们之间那些定律似的联系，它们提供了理解自然现象的钥匙。”（Holton 1988, 252）

由于物理学的方法实质上没有变，所以，物理学家所拥有的理想，以及物理学家应有的行为也没有变。科学有其未整理的文化规范——社会学家罗伯特·梅顿 1942 年称之为科学的气质，或者，一套惯常规矩。例如，科学家一般坚持“普遍性”观念（科学断言的评价应该是泛人的与客观的），相信秘密应予避免（一种“地方自治主义”），并接受“有组织的猜疑”是宣称新知识的正当态度。这些以及别的规则偶遭破坏，但它们仍被奉为规则。1930 年令 N-射线事物终止的规则，跟 1989 年宣布冷聚变有

效性的登上舞台的规则大体上是相同的。

20 世纪物理学所发生的巨大变化是建立在已有事实与健康地尊重传统的基础上的。有几次企图把物理学置于一个崭新的世界观上（如 30 年代被爱丁顿与米尔恩提出的），但他们都失败了。看来似乎奇怪，尊重传统能够产生革命。但这正好就是托马斯·库恩 1962 年描述为“常规科学”的东西。另一方面，在库恩的 1962 年提议的强意义下，即新范式跟旧范式不调和与全然不同，有时遵循范式规则或“常规”科学的变化却不是革命的。在 20 世纪没有发生这样的革命。归根结底，20 世纪 90 年代的物理学家既没有引入量子不连续性来理解 1900 年普朗克工作精神与细节的麻烦，一个现代实验家也没有理解 1987 年 J·J·汤姆孙宣布电子的经典论文的失败。在沟通方面没有不可逾越的鸿沟。在 90 年代与 100 年前的物理学之间没有深刻的不可比性。

从上个世纪末以来实际吸取的结论是：物理学知识有极大的扩展，并导致新的、大为改进的诸多理论。但是，这些主要是累积地产生出来的，并没有跟过去完全脱钩。重现旧理论的成功一直总是重要的，而且，这种感觉上的要求保证了理论进步的一定连续性。当然，这个世纪的伟大发现与理论没有让旧有知识湮没，它们没有一个被拍板贬值得一无是处。许多实验事实在观念中仍然为事实。水星每年进动盈余 $0.43''$ 被爱因斯坦的相对论所说明而不是被抹去。未来的任何引力理论必须跟观察的事实共处。

物理学的大部分牢固地稳定下来。设想这些部分，被如此彻底检验、如此紧密地束缚于一个大的理论与实验的网络之中，激烈地发生变化已是越来越难以想象了。在几十年里，提议科学“合目的论地”发展，即向着反映自然的真正结构的知识状态发展，一直被看作是异端的与可笑的。如哲学家尼古拉斯·瑞歇尔所正确指出的：“有意义的科学进步一般是一个不添加事实而是



改变构架本身的事业。”(Rescher 1978, 48) 相对论、量子力学以及电弱作用都是这种改变构架的例子，而不是一开始就靠或提出新的实验事实。然而，这观点不是看轻“添加实验事实”的价值，而是敞开这样的问题，即是否存在最好的构架使一个理论处于一种稳定的或“完成的”状态之中。我们可以笑对那些世纪末相信物理学已经达到它的最终状态的物理学家的天真。但是，他们的失败并不意味着就不存在这样的状态。因为历史上提出的大多数理论证明都是错的，并不意味着今天被接受的理论也是错的，将会被全新的理论所取代。

人们也许猜测历史可能重复自身，明天的物理学家可能在自然中找到新的现象，要求理论物理学家一种大的重构——一种类似于 1895 ~ 1897 年的惊人发现的那一种。这种情景会出现吗？虽不能排除其可能性，物理学家似乎不太可能没有看到自然的某个大的、重要的方面。现代物理学大军极其复杂的、高精度的仪器触觉，使得这样的现象跟一百年前放射性不被物理学家发现，是大大地困难了。确认一个新发现断然跟基本理论相矛盾，要几十年的时间。1966 年，有人宣布发现了“第五种力”，一种在已确立的理论中不能说明的中程力。如果这发现被接受了，那么，就可能导理论物理的一个大的概念变化。但是，这情况没有发生。经过几年的实验与激烈的争论，证明这种力并不威胁在自然的 4 力运作的标准模型，第 5 力不存在。

在新的世纪中，物理学无疑将继续发展，并将做出新的有趣发现。但是，物理学进步的方式会有改变，许多最基本的方面将维持今天已知的原状。总会有令人激动的工作要做，总是要做出新的发现。但是否 21 世纪的物理学的发展，会跟 20 世纪的物理学一样有爆炸式的发展，那是远远不确定的。如我们在 26 章中所提到的，费曼相信：“我们生活的时代是我们发现基本定律的时代，这样的日子不会再回来了。”费曼的预言正确与否只能由

下个世纪的发展来证明。或许，某个在 21 世纪写物理学史的历史学家会再次引用费曼；为了赞美费曼的智慧或许为了说明他是怎样完全错误。



附录 | 进一步阅读

第 1 章

本章部分地以 Kragh 1996a 为基础。19 世纪物理学简介见 Harman 1982 与 Purrington 1997, 也可见 Brush 1978, 特别对于较广的脉络。关于 1925 年以前的整个情况, 特别是关于德国物理学的信息, 建议看 Jungnickel and McCormmach 1986。在 Hiebert 1979 与 Heilbron 1982 中可找到对于 19 世纪物理学的有用观点。Badash 1972 讨论了科学的完全性问题。Klein 1973 讨论了世界的力学图像。关于四维与非欧几里得空间, 见 Bork 1964 与 Beichler 1988。关于奥斯特瓦尔斯唯能论见 Kragh 1989a 与 Cantor and Hodge 1981。列邦的思想, 以及世纪之交的精神氛围, 见 Hiebert 1971 Hakfoort 1992, Nye 1974。

第 2 章

Forman, Heilbron, and Weart 1975 提供并讨论了 1900 年左右物理学的统计资料。物理学二级学科的情况见 Hirose and Nisio 1986。Pyenson and Skopp 1977 详细分析了德国的教育。Kelves 1976 对美国的物理学、化学与数学共同体进行了比较。长冈关于 1910 年欧洲物理学描述的说明是以 Badash 1967、Carazza and Kragh 1991 为基础的。Galdabini and Guiliani 1988 定量分析了 1900 ~ 1904 年间意大利物理学。Jungnickel and McCormmach 1986 有关于德国理论物理学的翔实信息。关于美国物理学见 Kelves 1987 与 Reingold and Reingold 1981。

第3章

Pais 1986 描述了 X 射线、放射性、电子的历史，以及原子、核与基本粒子物理学的其他侧面。Segré 1980 可读性很强，但说明不细。关于贝克勒尔发现放射性之路见 Martins 1997。关于早期试图说明放射性的努力见 Kragh 1997a。Falconer 1987、Feffer 1989、Dahl 1997 与 Davis and Falconer 1997 处理了电子的发现，其中最后一部著作重印了汤姆孙的许多论文。Aratzis 1996 概述了复杂的发现历史。Nye 1974 and 1980 考察了黑光、N 射线的伪发现。关于磁射线，见 Carazza and Kragh 1990。关于宇宙射线的发现见 Xu and Brown 1987 与 De Maria, Ianniello, and Russo 1991。

第4章

Conn and Turner 1965 包含 1895 至 1914 年间原子理论方面许多论文的摘要或全选。Sinclair 1987 与 Kragh 1997a and 1997b 讨论了汤姆孙原子模型的方方面面。McCormach 1966 分析了尼可尔逊模型。卢瑟福有核模型的诞生见 Heilbron 1968。关于玻尔的原子理论见 Heilbron and Kuhn 1969、Heilbron 1981 与 French and Kennedy 1985。Bohr 1963 重印了玻尔 1913 年的所有论文和备忘录。

第5章

关于量子理论的早期发展有大量的论著。最具综合性的或许是 Mehra and Rechenberg 1982 的第一卷。Kangro 1976 包含了早期实验的完整信息。Kuhn 1978 详细分析了从玻尔兹曼到普朗克的理论发展。可是，应该注意的是：库恩的解释是有争议的，并未被普遍接受。对于玻尔兹曼与普朗克方法之间关系的复杂问题，也可参考 Darrigol 1988a。关于量子力学历史的其他举荐的书包括 Hermann 1971、Hund 1974、Jammer 1966 与 Darrigol 1992。Klein 1970 提供了一个简明的历史。Mehra 1975 简介了索尔维会议。Barkan 1993 分析了 1911 年大会。

第6章

Mendelssohn 1977 是半通俗的低温物理学发展史。关于这一主题，Dahl 1992 作了较学术性的处理。Dahl 1984 对 19 世纪末到 20 世纪 90 年代超导性的历史给出了一个完整的描述。Scurlock 1992 描述了低温技术发展的其他方面。从 1898 年到 20 世纪 20 年代的超导理论是 Kaiser 1987 的主题。Gavroglu and Goudaroulis 1989 也详细分析了超导性与超流性的历史，它强调更一般的与方法论方面。在 Cacimir 1983 中可以找到一名



莱顿物理学家关于超导性的发现以及凯末林·昂尼斯实验室的说明。

第 7 章

关于狭义相对论有很丰富的文献，这包括 Holton 1988、Goldberg 1984 与 Darrigol 1996。关于爱因斯坦以前的理论见 Hirose 1976 Nersessian 1986 与 Darrigol 1994。Miller 1981 详尽分析了爱因斯坦的 1905 年理论。最好的爱因斯坦传记是 Pais 1982。Goldberg 1976 与 Calison 1979 对早期的某些发展作了分析。关于广义相对论的早期历史见 Mehra 1974，较详细的分析见 Norton 1985 与 Earman and Glymour 1978。关于广义相对论的三个经典的检验在 Roseveare 1982（关于进动）、Earman and Glymour 1980a（关于光线弯曲）和 Earman and Glymour 1980b（关于引力红移）中作了分析。Hentschel 1900 对爱因斯坦对待实验的态度作了有益的分析。Hentschel 1990 详细说明了对于相对论的科学与非科学反应。关于不同国家接受相对论的情况，见 Glick 1987。

第 8 章

McCormach 1970 讨论了电磁世界观。Jammer 1961 含有关于质量的电磁概念的一个紧致说明。Miller 1986 是一个论文集，研究没有相对论的电磁学，包括对庞加莱 1906 年的电子理论所作的详细分析。关于阿布拉罕的刚性电子的讨论见 Goldberg 1970。关于变质量实验见 Miller 1981、Cushing 1981 与 Batimelli 1981。关于早期原子与核物理学中电磁质量的作用见 Siegel 1978。Kragh 1985 中含有 20 年代关于变质量的实验信息。在 20 世纪第一个 1/3 世纪关于本理论与其他统一理论的最好资源是 Vizgin 1994。

第 9 章

Atherton 1984 是对于电技术史的一般说明。关于线圈载荷与长途电话见 Wasserman 1985，关于连续载荷方法，见 Kragh 1994。Hoddeson 1981a 与 Fagen 1975 涵盖了 AT&T 的早期研究。Russo 1981 讲述了一个关于戴维逊与杰尔默发现电子衍射的有趣故事。关于真空管的发展细节见 Tyne 1977。关于朗缪尔与通用电器研究见 Reich 1983 and 1985。Hartcup 1988、Schröder-Gudenus 1978、Kevles 1987 与 Cardwell 1975 讨论了第一次世界大战期间物理学的方方面面。

第 10 章

德国共和的科学政策与基金见 Schröder-Gudehus 1978 与 Forman 1974。20 世纪 20 年代的国际科学政策也可见 Cock 1983。Heibron 1986 与 Cassidy 1992 对于这一时期的德国科学给出有趣的说明，从普朗克与海森伯的生活可见一斑。关于年轻的前苏联的物理学与科学政策，详情见 Josephson 1991。Forman 1973 分析了德国物理学家的意识形态。Forman 1971 坚持德国共和的知识氛围决定地影响物理学家关于量子现象的思考。弗曼的有争议的观点在 Hendry 1980 与 Kraft and Kroes 1984 中受到批评。

第 11 章

由 Jammer 1966、Hendry 1984a、MacKinnon 1982、Darrigol 1992 和 Mehra and Rechenberg 1982 and 1987 著述的书属于处理 20 世纪 10 ~ 20 年代量子理论历史问题的著作。关于薛定谔方程的方方面面见 Kragh 1982b，以及进一步见 Bithol and Darrigol 1992。Pais 1991（论玻尔）、Cassidy 1992（论海森伯）、Dresden 1987（论克拉默斯）、Moore 1989（论薛定谔）与 Kragh 1990（论狄拉克）写的传记也值得参考。Darrigol 1993 分析了德布洛意理论，Wheaton 1983 详述了波粒二象性的实验历史。Kragh 1981a and 1990 与 Moyer 1981 讨论了狄拉克方程的起源。关于量子力学的接受与传播见 Mehra and Rechenberg 1982 第四卷、Sopka 1988、Heilbron 1985、Cartwright 1987、Kojevnikov and Novik 1989。在这些文献中，Heilbron 1985 与 Cartwright 1987 讨论了美国人对哲学问题不感兴趣。在英译版的经典文献中，包括 Haar 1967 Van der Waerden 1967 Ludwig 1968

第 12 章

在 Beyer 1949 与 Brink 1965 中重印了核物理学的原著。关于早期核模型可特别见 Stuewer 1983 and 1986a。Badash 1983 给出了一个简明的评论。Stuewer 1979 是一个关于 20 世纪 30 年代物理学史学术会议进展的合订本。关于剑桥与维也纳的争端的详细说明见 Stuewer 1985a。关于质子-电子模型及其问题见 Pais 1986、Brown and Rechenberg 1996、Bromberg 1971 与 Weiner 1972。Brown 1972 有早期中微子的故事。Carazza and Kragh 1995 介绍了海森伯的晶格世界观。关于氘的发现见 Stuewer 1986c 与 Brickiwedde 1982。我关于早期核天文学的说明出自 Kragh 1996b。最早阶段的更详尽分析见 Hufbauer 1981。Heilbron and Seidel 1989 详尽地描述了早期回旋加速器。关于开文迪什高压机器见 Hendry 1984b。关于玻尔涉足物理学，Aaserud 1990 提供了一个有趣的视角。



第 13 章

关于狄拉克与正子部分是以 Kragh 1990 为基础的。在这一主题上, 也可见 Hanson 1963、Moyer 1981、Kragh 1989、De Maria and Russo 1985 与 Roqué 1997a。在关于处理早期粒子物理学的著作中 Brown 和 Hoddeson 1983 极具启发性, 特别就理论而言。Pais 1986 Kragh 1995 Brown and Rechenberg 1996, 也是如此。Rueger 1992, 扼要介绍了 20 世纪 30 年代量子电动力学问题, Kragh 1995 分析了通过引入最小长度解决问题的种种尝试。De Maria and Russo 1989 Galison 1983 1987, and 1997 Cassidy 1981 分析了周期系中宇宙射线物理学, μ 子的发现, 以及理论与实验的关系。关于介子的发现与早期的介子理论见 Brown 1981 Darrigol 1988a Brown and Hoddeson 1983 Brown and Rechenberg 1983 Brown and 关于周期系的几篇重点论的复印件可在 Rechenberg 1996 Cahn and Golhaber 1989 中找到。关于宇宙射线研究的, 可见 Hillas 1972。

第 14 章

量子哲学的文献是大量的, 但大多数是非历史的。处理 20 世纪 20 ~ 30 年代情况历史的著作 Hendry 1984a、MacKinnon 1982 与 Jammer 1966。Whitaker 1996 是一本好的、主要是非技术的说明。Jammer 1974 仍是一本最好的历史与哲学简介。关于互补性历史的不同侧面见 Beller 1992 与 Heilbron 1985, Holton 1988。在 Pinch 1977 与 Caruana 1995 中, 对冯诺伊曼的解释作了批评性评论。Cushing 1995 对量子力学的解释作了详尽的、历史的哲学考察, 特别强调了玻姆的立场。Wheeler and Zurek 1983 中有 1926 ~ 1980 年期间许多重要原始论文的重印件。

第 15 章

20 世纪 30 年代宇宙物理学的趋势在 Kragh 1982a 中有分析, 本章的部分内容以此为基础。关于爱丁顿理论见 Kilmister 1994, 关于其哲学观见 Yolton 1960。Rueger 1988 讲述了爱丁顿对于薛定谔的激励。米尔恩系统被 Harder 1974 与 Urani and Gale 1993 所处理。狄拉克的宇宙观见 Kragh 1990。自然常数的数字关系在 Barrow 1981 与 Barrow and Tipler 1986 中作了简介。

第 16 章

关于第三帝国物理学的详细说明, Beyerchen 1977 是第一个、仍然是最好的论著。这一主题也可见 Walker 1995, 它集中讲了德国的核能项目。在论文集中, Renneberg

and Walker 1994 与 Mehrtens and Richter 1980 对 1933 ~ 1945 年间德国的科学与技术作了有价值的分析。在 Hentschel 1996 中可找到一个较好的、有注释的、译成英文的原始论文集。在许多传记中, 如 Heibron 1986 (关于普朗克)、Cassidy 1992 (关于海森伯) 与 Sime 1996 (关于迈特勒), 涵盖了纳粹德国物理学家的生活条件。纳粹政权对物理学研究的影响在 Fischer 1988 中作了定量的考察。Graham 1972 中含有斯大林时代前苏联物理学与宇宙学的一些章节。Josephson 1991 详尽分析了这期间的苏联物理学, 包括了意识形态与研究机构的来龙去脉。这方面的主题也可见 Gorelik 1995、Vucinich 1980 与 Kojevnikov 1991。关于墨索里尼时代的意大利物理学见 Holton 1978。

第 17 章

关于 30 年代的美国物理学见 Weiner 1970 与 Kevles 1987。Weiner 1969 研究了美国的物理学难民。关于两次世界大战之间的美国物理学, Weart 1979a 给出了一个定量的说明。对 20 世纪 30 年代物理学家侨民的最好研究见 Holton 1983、Hoch 1983 与 Rider 1984, 也可见 Fermi 1971。Stuewer 1984 从一位侨居者的视角考察了核物理学的情况。

第 18 章

在许多地方讨论了裂变的发现, 例如 Graetzer and Anderson 1971、Weart 1983 与 Krafft 1983。对于 1939 年裂变发现新闻的反应, Badash, Hodes, and Tiddens 1986 作了详细的研究。Graetzer and Anderson 1971 重印并翻译了 1939 ~ 1945 年间几篇重要的论文, Wohlfarth 1979 也做了同样的工作 (用英文与德文)。两名关键物理学家的个人回忆文集见 Frisch and Wheeler 1967。Stuewer 1985b、Weart 1976 介绍核裂变早期工作。Stuewer 1994 提供了 20 世纪 30 年代核物理学背景, 对于法国的核能工作作了充分的描述。Gowing 1964 介绍了英国的情况。关于导向 1945 年原子弹爆炸的道路, Rhodes 1986 提供了一个完全的、易读的历史。教科书中只简要地描述德国与俄罗斯的核项目, 其细节可在 Powers 1993 与 Walker 1995 (关于德国) 和 Holloway 1994 与 Rhodes 1995 (关于俄罗斯) 中找到。关于日本企图发展原子弹的更多情况见 Wilcox 1985。

第 19 章

战后核物理学没有一个好的历史论著。但从 Brink 1995 关于诺贝尔奖讲演与简介, 可追溯它的发展的几个高潮。关于核的壳层模型可见 Lee and Wiringa 1990。Mladjenović 1998 是一个综合性的有益梗概。关于嬗变元素的早期发现可参阅 Weeks



1968, 它仍是关于化学元素发现方面的标准著作。全视角中的核能历史见 Goldschmidt 1982。核武器与战后时期的核政策是许多论著的主题。Badash 1995 是一部好的引导读物。更详细的说明见 Hewlett 1989。关于 1939 ~ 1990 年间核政策的原始文集可在 Cantelon, Hewlett, and Williams 1991 中找到。关于氢弹的发展见 Rhodes 1995。受控聚变的历史在 Hendry 1987 (前期历史)、Hendry and Lawson 1993 (英国项目)、Post 1995 (主要是科学方面) 和 Bromberg 1982 (美国项目) 给出。

第 20 章

关于美国战后物理学 (或一般科学) 的政治与军事方面, 有大量的文献, 大多数专注于 1945 年以后头一二十年美国的情况。Forman 1987 就是一个好的例子。最一般的分析见 Dickson 1984 与 Greenberg 1967。关于大科学物理学见 Galison and Hevly 1992 与 Weinberg 1967。Schweber 1989 是一篇关于 20 世纪 50 年代粒子物理学的政治与意识形态关系的有趣文章。Hoddeson et al. 1979 涉及 20 世纪 60 ~ 70 年代高能大科学的方方面面。关于日本的加速器与大科学, 在教科书中仅略提及, 详见 Hoddeson 1983。关于 CERN 的历史详见 Hermann et al 1987 ~ 1990 与 Krige 1996。Irvine et al. 1986 提供了一个关于 1960 ~ 1985 年间美国与欧洲加速器之间的文献资料有趣比较。详情见 Irvine and Martin 1985。

第 21 章

关于粒子物理学的二级文献是综合性的。Pais 1986 是有益的, 特别在理论方面。Doncel et al. 1987 专注于讨论对称性原理。Cahn and Goldhaber 1989 提供了一个有重印 98 篇著名实验论文支持的紧致描述。Brown, Dresden, and Hoddeson 1989、Hoddeson et al. 1997 与 Foster and Fowler 1988 是信息详实的文集。Newman and Ypsilantis 1996 是关于现代高能物理学的厚实的历史文集, 主要面向物理学家。Cline and Riedasch 1984 与 Franklin 1986 讨论了弱相互作用物理学的各个方面。对于 1950 ~ 1975 年间弱相互作用的综合性文献比较分析, 可见诸于 White, Sullivan, and Barboni 1979 与 Koester, Sullivan and White 1982。夸克历史的实验方面见 Pickering 1981, 通俗读物见 Riordan 1987。探测器细节以及高能物理学“物质文化”的其他方面, 见 Galison 1997。进一步的文献列于 Hovis and Kragh 1991 中。

第 22 章

1952 年以前关于 QED 的完全而详尽的历史处理见 Schweber 1994a。Brown 1993 分

析了重整化物理学的其他方面。关于 QED 的历史说明也可见 Weinberg 1977 与 Aramaki 1987 和 1989。Schwinger 1958 重印了 1929 ~ 1953 年间最重要的 QED 论文选。对于从 1943 ~ 1985 年间 S 矩阵的发展以及相关的主题，Cushing 1990 作了专业性的分析，不太烦人的分析见 Freundlich 1980。Cao 1997 是一个综合性的概念史，追溯 1990 年以前场论的发展。Galison 1987 分析了中性流的发现，Pickering 1984b 则从一个不同的观点进行分析。Pickering 1984a 与 Pais 1986 对于 20 世纪 60 ~ 70 年代粒子物理学作了有价值的简介。Cahn and Goldhaber 1989 包含许多开拓性论文的重印。一个关于 1965 ~ 1980 年间的粒子物理学翔实资源，见 Hoddeson et al. 1997。关于 1983 年中间矢玻色子的发现，见 Watkins 1986 的通俗介绍。进一步的文献列于 Hovis and Kragh 1991 中。

第 23 章

本章内容以 Kragh 1996b 为基础。那里对于 1930 ~ 1967 年间的宇宙学给出了一个完全的描述。现代宇宙学的方方面面见 Bertotti et al. 1990 与 Lightman and Brawer 1990。Hetherington 1993 是一个关于宇宙学的历史与哲学的论文集。Bernstein and Feinberg 1986 包含了一些重要的经典论文选。Harwit 1981 以原创与迷人的方式讲述了天文学的发现。Eisenstaedt 1989 讨论了 1925 ~ 1955 年间广义相对论的命运。战后广义相对论的发展见 Thorne 1994、Will 1993 以及 Hawking and Israel 1987 中的论文。Collins 1992 考察了关于韦伯宣称探测到引力波的争论。

第 24 章

固体物理学的最好与最具综合性的史书是 Hoddeson et al 1992，这是一部涵盖该学科从 19 世纪的根基一直到 1960 年前后的发展的精耕细作。我特别使用了 Hoddeon, Baym and Eckert 1992、Braun 1992 与 Weart 1992 的著作。Eckert and Schubert 1990 与 Braun and MacDonald 1978 也是有价值的，前者强调了应用科学方面；主要处理半导体电子学。Hoddeson 1981b 与 Riordan and Hoddeson 1997 详细说明了晶体管的发明。1930 年以后超导性的研究，见 Dahl 1996、Gavroglu and Goudaroulis 1989 与 Bardeen 1973。高温超导性的发现与早期研究见 Hazen 1988。

第 25 章

微电子学的演化见 Eckert and Schubert 1990、Braun and MacDonald 1978 与 Riordan and Hoddeson 1997。微波技术的早期发展见 Forman 1992 and 1995。Bromberg 1991 与



Bertolotti 1983 描述了激光的历史。光纤见 Faltas 1988 与 Bray 1995。贝尔实验室的历史, Smith 1985, 对于通讯技术的许多方面有重要的资源意义。关于贝尔实验室的研究见 Bernstein 1984。

第 26 章

Brinkman 1986 对美国物理学在 1965 ~ 1985 年间状况的资料作了讨论。关于美国物理危机见 Kevles 1987 与 Schweber 1994b and 1995。更一般的反文化浪潮, 包括许多反科学与另类科学, 见 Easlea 1973、Nowotny and Rose 1979 与 Burnham 1987 所作的分析。现代关于科学的终结的讨论是 Horgan 1996 以及 Elvee 1992 中论文的主题。Rescher 1978 提供了一个哲学视角。

第 27 章

关于战后统一场论与粒子理论没有好的历史著作。关于其早期的情况, 见 Vizgin 1994。Ashtekar 1991 简要地介绍了量子引力理论的历史。20 世纪 80 年代早期以前的大统一理论在 Pickering 1984a 中有描述, 通俗介绍见 Trefil 1983。现代统一理论的原始文献论文集, 在 Zee 1982 中可找到。Schramm 1996 专注于天体物理学与宇宙学方面。关于超弦理论见 Davies and Brown 1988、Galison 1995 与 Schwarz 1996。

第 28 章

诺贝尔奖的动因与讲座, 连同传记论文, 迄今为止已编纂了 6 卷, 见 [诺贝尔] 1967 ~ 1997。诺贝尔机构的起源与早期发展在 Crawford 1984 中有叙述。1901 ~ 1939 年诺贝尔提名与被提名者名单见 Crawford, Heilbron and Ullrich 1987。关于诺贝尔物理奖的程序分析见 Friedmann 1981 and 1989。Crawford, Sime and Waiker 1997 是关于战后诺贝尔物理学的为数不多的著作之一。

附录 | 文献目录

期刊的缩写

<i>AHES</i>	精密科学历史的成就
<i>AJP</i>	美国物理学期刊
<i>AS</i>	科学年鉴
<i>BW</i>	科学史报道
<i>HS</i>	科学历史
<i>HSPS</i>	物理科学的历史研究（自 1988：物理学与生物学的历史研究）
<i>NS</i>	新科学家
<i>PS</i>	科学透视
<i>PRSA</i>	伦敦皇家学会进展，A 卷
<i>PT</i>	今日物理
<i>RHS</i>	科学历史评论
<i>RMP</i>	现代物理评论
<i>SHPMP</i>	现代物理学的历史与哲学研究
<i>SHPS</i>	科学的历史与哲学研究
<i>SIC</i>	科学的来龙去脉
<i>SSS</i>	科学的社会学研究
<i>T&C</i>	技术与文化



- Aaserud, Finn. 1990. *Redirecting Science: Neils bohr, Philanthropy, and the Rise of Nuclear Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Anderson, Philip. 1971. "Are the big machines necessary?" *NS* 82: 510 ~ 514.
- . 1972. "More is different," *Science* 177: 393 ~ 396.
- . 1995. "Historical overview of the twentieth century in physics," in Brown, Pais, and Pippard, eds., pp. 2017 ~ 2032.
- Anthony, L. J., H. East, and M. J. Slater. 1969. "The growth of the literature in physics," *Reports on Progress in Physics* 32: 709 ~ 767.
- Arabatizis, Theodore. 1992. "The discovery of the Zeeman effect: A case study of the interplay between theory and experiment," *SHPS* 23: 4365 ~ 4388.
- . 1996. "Rethinking the 'discovery' of the electron," *SHPMP* 27: 405 ~ 435.
- Aramaki, Seiya. 1987. "Formation of the renormalization theory in quantum electrodynamics," *HS* 32: 1 ~ 42.
- . 1989. "Development of the renormalization theory in quantum electrodynamics," *HS* 37: 91 ~ 113.
- Aronovitch, Lawrence. 1989. "The spirit of investigation: Physics at Harvard University, 1870 ~ 1910," in Frank A. J. L. James, ed. *The Development of the Laboratory*. London: Macmillan, pp. 83 ~ 100.
- Ashtekar, A. 1991. "the winding road to quantum gravity," in A. Ashtekar and John Stachel, eds., *Einstein studies. Vol. 3: Conceptual Problems of Quantum Gravity*. Boston: Birkhäuser, pp. 1 ~ 9.
- Atherton, W. A. 1984. *From Compass to Computer: A History of Electrical and Electronics Engineering*. San Francisco: San Francisco Press.
- Badash, Lawrence. 1967. "Nagaoka to Rutherford, 22 February 1911," *PT* 20 (April): 55 ~ 60. Reprinted in Weart and Phillips. Eds., 1985, pp. 103 ~ 107.
- . 1972. "The completeness of nineteenth-century science," *Isis* 63: 46 ~ 58.
- . 1983. "Nuclear physics in Rutherford's laboratory before the discovery of the neutron," *AJP* 51: 884 ~ 888.
- Badash, Lawrence, Elisabeth Hodes, and Adolph Tiddens. 1986. "Nuclear fission: Reactions to the discovery in 1939," *Proceedings of the American Philosophical Society* 130: 196 ~ 231.
- Bardeen, John. 1973. "History of superconductivity research" in B. Kursunoglu and A. Perlmetter, eds., *Impact of Basic Research on Technology*. New York: Plenum Press, pp. 15 ~ 57.
- Barkan, Diana K. 1993. "The witches' Sabbath: The first international Solvay congress in physics," *SIC* 6: 59 ~ 82.
- Barrow, John D., 1981. "The lore of large number: Some historical background to the anthropic principle," *Quarterly journal of the Royal Astronomical Society* 22: 388 ~ 420.
- Barrow, John D., and Frank J. Tipler. 1986. *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford: Oxford Uni-

- versity Press.
- Battikmelli, G. 1981. "The electromagnetic mass of the electron; A case study of a non-crucial experiment," *Fundamenta Scientiae* 2: 137 ~ 150.
- Beichler, James E. 1988. "EDther/or; Hyperspace models of the ether in America," in Stanley Golberg and Roger H. Stuewer, eds., *The Michelson Era in American Science 1870 ~ 1930*. New York: AIP Conference Proceedings no. 179, pp. 206 ~ 223.
- Beller, Mara. 1992. "The birth of Bohr's Complementarity; The context and the dialogues," *SHPS* 23: 147 ~ 180.
- Bernal, John D. 1939. *The Social Function of Science*. London: Routledge & Sons.
- Berstein, Jeremy. 1984. *Three Degrees Above Zero: Bell Labs in the Information Age*. New York: Scribner's.
- Berstein, Jeremy, and Gerald Feinberg, eds. 1986. *Cosmological Constants; Papers in Modern Cosmology*. New York: Columbia University Press.
- Betolotti, Mario. 1983. *Masers and Lasers; An Historical Approach*. Bristol, England: Adam Hilger.
- Betolotti, Bruno, et al., eds. 1990. *Modern Cosmology in Retrospect*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Beyer, Robert T., ed. 1949. *Foundations of Nuclear Physics*. New York: Dover Publications.
- Beyerchen, Alan D. 1977. *Scientists under Hitler; Politics and the Physics Community in the Third Reich*. New Haven: Yale University Press.
- Bishop, Amasa S. 1958. *Project Sherwood—The U. S. Program in Controlled Fusion*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Bitbol, Michel, and Oliver Darrigol, eds. 1992. *Erwin Schrödinger; Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*. Paris: Editions Frontières.
- Bog, J. W., P. E. Rubinin, eds. 1990. *Kapitza in Cambridge and Moscow: Life and Letters of a Russian Physicist*. Amsterdam: North-Holland.
- Bohr, Niels. 1963. *On the Constitution of Atoms and Molecules* With an introduction by I. Rosonfeld. Copenhagen: Munksgaard.
- Boltzmann, Ludwig. 1992. "A German professor's trip to El Dorado," *PT* 45 (January): 44 ~ 51.
- Bork, Alfred M. 1964. "The fourth dimension in nineteenth-century physics," *Isis* 55: 326 ~ 338.
- Born, Max. 1978. *My life; Recollection of a Nobel Laureate*. New York: Charles Scribner's Sons.
- Braun, Ernest. 1992. "Selected topics from the history of semiconductor physics and its applications," in Hoddeson et al., eds., pp. 443 ~ 488.
- Braun, Ernest, and Stuart MacDonald. 1978. *Revolution in Miniature; The History and impact of Semiconductor Electronics*. Cambridge: Cambridge University Press.



- Bray, John. 1995. *The Communications Miracle*. New York: Plenum Press.
- Brickwedde, Ferdinand G. 1982. "Harold Urey and the discovery of deuterium," *PT* 35 (September): 34 ~ 39.
- Bridman, Percy. 1950. *Reflections of a Physicist*. New York: Philosophical Library.
- Brink, David M., ed. 1965. *Nuclear Forces*. New York: Pergamon.
- , 1995. "Nuclear dynamics," in Brown, Pais and Pippard, eds., pp 1183 ~ 1232.
- Brinkman, William F., et al., eds. 1986. *Physics Through the 1990's: An Overview*, Washington, D. C.: Washington Academy Press.
- Bromberg, Joan. 1971. "The impact of the neutron: Bohr and Heisenberg," *HSPS* 3: 307 ~ 341.
- . 1976. "The concept of particle creation before and after quantum mechanics," *HSPS* 7: 161 ~ 191.
- . 1982. *Fusion: Science, Politics, and the Invention of a New Energy Source*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- . 1991. *The Laser in America, 1950 ~ 1970*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Brown, Laurie. 1972. "The idea of the neutrino," *PT* 31 (September): 23 ~ 28.
- . 1981. "Yukawa's prediction of the meson," *Centaurus* 25: 71 ~ 132.
- . ed. 1993. *Renormalization: From Lorentz to Landau (and Beyond)*. New York: Springer-Verlag.
- Brown, Laurie, Max Dresden, and Lillian Hoddeson, eds. 1989. *Pions to quarks: Particle Physics in the 1950s*. New York: Cambridge University Press.
- Brown, Laurie, and Lillian Hoddeson, eds. 1983. *The Birth of Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brown, Laurie, Abraham Pais, and Brian Pippard, eds. 1995. *Twentieth Century Physics*. 3 vols. New York: AIP Press.
- Brown, Laurie, and Helmut Reichenberg. 1996. *The Origin of the Concept of Nuclear Forces*. Bristol, England: Institute of Physics Publishing.
- Brush, Stephen G. 1978. *The temperature of History: Phases of Science and Culture*. New York: Burt Franklin & Co.
- . 1986. *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*. Amsterdam: North-Holland.
- Buchwald, Jed Z. 1994. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press.
- Bullard, Edward. 1975. "The effect of World War II on the development of knowledge in physical sciences," *PRSA* 342: 519 ~ 536.
- Bunge, Mario, and William R. Shea, eds. 1979. *Rutherford and Physics at the Turn of the Century*. New York: Science History Publications.

- Burnham, J. C. 1987. *How Superstition Won and Science Lost*. New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press.
- Cahan, David. 1985. "The institutional revolution in German physics, 1865 ~ 1914," *HSPS* 15: 1 ~ 65.
- . 1989. *An Institute for an Empire: The Physikalisch-Technische Reichsanstalt 1871 ~ 1918*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cahn, Robert N., and Gerson Goldhaer. 1989. *The Experimental Foundation of Particle Physics*. New York: Cambridge University Press.
- Cantelon, Philip L., Richard G. Hewlett, and Robert C. Williams, eds. 1991. *The American Atom: A Documentary History of Nuclear policies from the Discovery of Fission to Present*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press.
- Cantor, G. M., and M. J. S. Hodge, eds. 1981. *Conceptions of Ether: Studies in the History of Ether Theories 1740 ~ 1900*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cao, Tian Yu. 1997. *Conceptual Development of 20th Century Field Theories*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Carazza, Bruno, and Helge Kragh 1990. "Augusto Righi's magnetic rays: A failed research program in early 20th-century physics," *HSPS* 21: 1 ~ 28.
- . 1991. "An Oriental in Europe: Nagaoka, Righi, and the state of physics 1910," *HS* 41: 37 ~ 44.
- . 1995. "Heisenberg's lattice world: The 1930 theory sketch," *AJP* 63: 595 ~ 605.
- Cardwell, Donald S. L. 1975. "Science and World War I," *PRSA* 342: 447 ~ 456.
- Cartwright, Nancy. 1987. "Philosophical problems of quantum theory: The response of American physicist," in Lorenz Krüger, Gerd Grägerenzer, and Mary Morgan, eds., *The Probabilistic Revolution. Vol. 2. Ideas in the Sciences*. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp. 417 ~ 435.
- Caruana, Louis. 1995. "John von Neumann's 'impossibility prove' in a historical perspective," *Physics* 32: 10.9 ~ 24.
- Casimir, Hendrik. 1983. *Haphazard Reality*. New York: Harper and Row.
- Cassidy, David. 1981. "Cosmic ray showers, high energy physics, and quantum field theories: Programmatic interactions in the 1930s," *HSPS* 121: 1 ~ 39.
- . 1992. *Uncertainty: The life and Science of Werner Heisenberg*. New York: W. H. Freedman and Co.
- Chew, Geoffrey F. 1970. "Hadron bootstrap: Triumph or frustration?" *PT* 23 (November): 23 ~ 28.
- Cline, David and Gail Riedasch, eds. 1984. *50 Years of Weak Interactions*. Madison: University of Wisconsin.
- Cock, A. G. 1983. "Chauvinism and internationalism in science: The International Research Council, 1919 ~ 1926," *Notes & Records of the Royal Society* 37: 249 ~ 288.
- Collins, Harry M. 1992. *Change Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Chicago: University



of Chicago Press.

- Collins, Harry, and Trevor Pinch. 1992. *The Golem: What Everyone Should Know about Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Conn, G. K. T. and H. D. Turner. 1965. *The Evolution of the Nuclear Atom*. London: Iliffe Books.
- Crawford, Elisabeth. 1984. *The Beginnings of the Nobel Institution: The Science Prizes, 1901 ~ 1915*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Crawford, Elisabeth, John L. Heilbron, and Rebecca Ullrich. 1987. *The Nobel Population 1901 ~ 1937: A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry*. Berkeley, Calif.: Office for History of Science and Technology.
- Crawford, Elisabeth, Ruth L. Sime, and Mark Walk Walker. 1997. "A Nobel tale of postwar injustice," *PT* 50 (September): 26 ~ 32.
- Crease, Robert P., and Charles C. Mann. 1986. *The Second Creation: Makers of the revolution in 20th Century Physics*. New York: Collier Books.
- Cushing, James T. 1981. "Electromagnetic mass, relativity, and the Kaufmann experiments," *AJP* 49: 1133 ~ 1149.
- . 1990. *Theory Construction and Selection in Modern Physics: The S Matrix*. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 1995. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press.
- Dahl, Per F. 1984. "Kammerlingh Onnes and the discovery of superconductivity," *HSPS* 15: 1 ~ 38.
- . 1992. *Superconductivity: Its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides*. New York: AIP Press.
- . 1997. *Flash of the Cathode Rays: A History of J. J. Thomson's Electron*. Bristol, England: Institute of Physics Publishing.
- Darrigol, Olivier. 1988a. "The quantum electrodynamical analogy in early nuclear theory or the roots of Yukawa's theory," *RHS* 41: 225 ~ 297.
- . 1988b. "Statistics and combinatorics in early quantum theory," *HSPS* 19: 17 ~ 80.
- . 1992. *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*. Berkeley: University of California Press.
- . 1993. "Strangeness and soundness in Louis de Broglie's early works," *Physis* 30: 303 ~ 372.
- . 1994. "The electron theory of Larmor and Lorentz: A comparative study," *HSPS* 24: 265 ~ 336.
- . 1996. "The electrodynamic origins of relativity theory," *HSPS* 26: 241 ~ 312.
- Davis, P. C. W. and Julian Brown. 1988. *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge: Cambridge University Press.

- Davis, E. A. and Isobel Falconer. 1997. *J. J. Thomson and the Discovery of the Electron*. London: Taylor & Francis.
- De Maria, M., M. G. Ianniello, and A. Russo. 1991. "The discovery of cosmic rays: Rivalries and controversies between Europe and the United States," *HSPS* 22: 165 ~ 192.
- De Maria, M., and A. Russo. 1985. "The discovery of the positron," *RSS* 2: 237 ~ 286.
- . 1989. "cosmic ray romancing: The discovery of the latitude effect and the Compton-Millikan controversy," *HSPS* 19: 211 ~ 266.
- Dickson, David. 1984. *The New Politics of Science*. New York: Pantheon Books.
- Doncel, Manuel, et al., eds. 1987. *Symmetries in Physics (1600 ~ 1980)*. Barcelona: Seminari d' Història de les Ciències.
- Dresden, Max. 1987. *H. A. Kramers: Between Tradition and Revolution*. New York: Springer.
- Farman, John, and Clark Glymour. 1978. "Lost in tensors: Einstein's struggles with covariance principles, 1912 ~ 1916," *SHPS* 9: 251 ~ 278.
- . 1980a. "Relativity and eclipses: The British eclipses expeditions of 1919 and their predecessors," *HSPS* 11: 49 ~ 85.
- . 1980b. "The gravitational redshift as a test of general relativity," *SHPS* 11: 175 ~ 214.
- Easlean Brian. 1973. *Liberation and Aims of Science*. London: Chatto & Windus.
- Eckert, Michael, and Helmut Schubert. 1990. *Crystals, Electrons, Transistors: From Scholar's Study to Industrial Research*. New York: American Institute of Physics.
- Einstein, Albert. 1982. "How I created the theory of relativity," *PT* 35 (August): 45 ~ 47.
- Eisenstaedt, Jean. 1989. "The low water mark of general relativity," in Donald Howard and John Stachel, eds. *Einstein and the History of General Relativity*, Boston: Birkhäuser, p-p. 277 ~ 292.
- Eisenstaedt, Jean, and Ana J. Kox, eds. 1992. *Einstein Studies*. Vol. 3: *Studies in the History of General Relativity*, Boston: Birkhäuser.
- Elvee, Richard Q., ed 1992. *The End of Science? Attack and Defense*. Lanham, Md.: University Press of America.
- Elzinga, Aant. 1995. "Einstein in the land of Nobel: An episode in the interplay of science, politics, epistemology, and popular culture," in Kostas Gavroglu, John Stachel, and Marx Wartofsky, eds. *Physics, Philosophy and the Scientific Community*, New York: Kluwer, pp. 73 ~ 103.
- Exhela, V. V., et al. 1996. *Particle Physics: One Hundred Years of Discoveries. An Annotated Chronological Bibliography*. Woodbury, N. Y.: AIP Press.
- Fadner, W. L. 1988. "Did Einstein really discover ' $E = mc^2$ '?" *AJP* 56: 114 ~ 122.
- Faggen, M. D., ed. 1975. *A History of Engineering and Science in the Bell System: The Early Years, 1875 ~ 1925*. Whippany, N. J.: Bell Telephone Laboratories.



- Falconer, Isobel. 1987. "Corpuscles, electrons and cathode rays: J. J. Thomson and the 'discovery of the electron'," *British Journal for the History of Science* 20: 241 ~ 275.
- Feffer, Stuart. 1989. "Arthur Schuster, J. J. Thomson, and the electron," *HSPS* 20: 33 ~ 61.
- Fermi, Laura. 1971. *Illustrious Immigrants: The Intellectual Migration from Europe 1930 ~ 1941*. Chicago: University of Chicago Press.
- Feyerabend, Paul. 1978. *Science in a Free Society*. London: New Left Books.
- Feynman, Richard P. 1992. *The Character of Physical Law*. London: Penguin books.
- Fischer, Klaus. 1988. "Der quantitative Beitrag der nach 1933 emigrierten Naturwissenschaftler zur deutschsprachigen physikalischen Forschung," *BW* 11: 83 ~ 104.
- . 1993. *Changing Landscapes of Nuclear Physics: A Scientometric Study on the Social and Cognitive Position of German-Speaking Emigrants Within the Nuclear Physics Community, 1921 ~ 1947*. Berlin: Springer-Verlag.
- Forman, Paul. 1968. "The doublet riddle and atomic physics circa 1924," *Isis* 59: 156 ~ 174.
- . 1971. "Weimar culture, causality, and quantum theory, 1918 ~ 1927: Adaption by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment," *HSPS* 3: 1 ~ 115.
- . 1973. "Scientific internationalism and the Weimar physicists: The ideology and its manipulation in Germany after World War I," *Isis* 64: 151 ~ 178.
- . 1974. "The financial support and political alignment of physicists in Weimar Germany," *Minerva* 12: 39 ~ 66.
- . 1987. "Behind quantum electronics: National security as basis for physical research in the United States, 1940 ~ 1960," *HSPS* 18: 149 ~ 229.
- . 1992. "Inventing the maser in postwar America," *Osiris* 7: 105 ~ 134.
- . 1995. "'Swords into ploughshares': Breaking new ground with radar hardware and technique in physical research after World War II," *RMP* 67: 397 ~ 455.
- Forman, Paul, John L. Heilbron, and Spencer Weart. 1975. "Physics circa 1900: Personnel, funding, and productivity of the academic establishments," *HSPS* 5: 1 ~ 185.
- Forster B., and P. H. Fowler, eds. 1988. *40 Years of Particle Physics*. Britol, England: Adam Hilger.
- Franklin, Allan. 1986. *The Neglect of Experiment*. New York: Cambridge University Press.
- French, Anthony P. J. Kennedy, Eds. 1985. *Niels Bohr: A Centenary Volume*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Frenkel, Victor Y. 1997. "Yakov Ilich Frenkel: Sketches towards a civic portrait," *HSPS* 27: 197 ~ 236.
- Freundlich, Yehudah. 1980. "Theory evaluation and the bootstrap hypothesis," *SHPS* 11: 276 ~ 277.
- Friedman, Robert M. 1981. "Nobel physics prize in perspective," *Nature* 292: 793 ~ 798.
- . 1985. "The context, and quicksand: Method and understanding in studying the Nobel science pri-

- zes," *HSPS* 22: 63 ~ 78.
- Frisch, Otto R., and John A. Wheeler. 1967. "The discovery of fission," *PT* 20: (November); Reprinted in Weart and Phillips, eds., 1985, pp. 272 ~ 281.
- Galdabini, Silvana, and Giuseppe Giuliani. 1988. "Physics in Italy between 1900 and 1940; The universities, physicists, funds and research," *HSPS* 19: 115 ~ 136.
- Galison, Peter. 1979. "Minkowski's space-time: From visual thinking to the absolute world," *ents End*. Chicago: University of Chicago Press.
- . 1995. "Theory bound and unbound: Superstrings and experiments," Friedel Weinert, ed., *Laws of Nature. Essays on the Philosophical, Scientific and Historical Dimensions*. Berlin: Walter de Gruyter, pp. 369 ~ 408.
- . 1997. *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Galison, Peter, and Bruce Hevly, eds. 1992. *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*. Calif: Stanford University Press.
- Caston, Jerry. 1973. *Originality and Competition in Science: A Study of the British High Energy Physics Community*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gavroglu, Kostas. 1995. *Fritz London: A Scientific Biography*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gavroglu, Kostas, and Yorgos Goudaroulis. 1989. *Methodological Aspects of the Development of Low Temperature Physics 1881 ~ 1956*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Glick, Thomson F., ed. 1987. *The Comparative Reception of Relativity*. Boston: Reidel.
- Goenner, Hubert. 1992. "The reception of the theory of relativity in Germany as reflected by books published between 1908 and 1945," in Eisenstaedt and Kox, eds., pp. 15 ~ 38.
- Goldberg, Stanley. 1970. "The Abraham theory of the electron: The symbiosis of experiment and theory," *AHES* 7: 7 ~ 25.
- . 1976. "Max Planck's philosophy of nature and his elaboration of the special theory of relativity," *HSPS* 7: 125 ~ 160.
- . 1984. *Understanding Relativity: Origin and Impact of a Scientific Revolution*. Boston: Birkhäuser.
- Goldschmidt, Bertrand. 1982. *The Atomic Complex: A Worldwide Political History Nuclear Energy*. La Grange Park, Ill.: American Nuclear Society.
- Gorelik, Gennady. 1995. "Meine Antisowjetische Tätigkeit. ...": *Russische Physiker unter Stalin*. Braunschweig, Germany: Vieweg.
- Gorelik, Gennady, and Victor Y. Frenkel. 1994. *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Gowing, Margaret M. 1964. *Britain and Atomic Energy 1939 ~ 1945*. London: Macmillan.
- Graetzer, Hans G., and David L. Anderson. 1971. *The Discovery of Nuclear Fission*. New York: Van



Nostrand Reinhold.

- Graham, Loren R. 1972. *Science and Philosophy in the Soviet Union*. New York; Alfred A. Knopf.
- Greenberg, Daniel. 1967. *The Politics of Pure Science*. New York; New American Library.
- Hahn, Otto. 1970. *My Life: The Autobiography of a Scientist*. New York; Harder and Harder.
- Hakfoort, C. 1992. "Science deified: Wilhelm Ostwald's energeticist world-view and the history of science," AS 49; 525 ~ 544.
- Hanson, Norwood Russell. 1963. *The Concept of the Positron*. Cambridge; Cambridge University Press.
- Hader, A. J. 1974. "E. A. Milne, scientific revolutions and growth of knowledge," AS 31; 351 ~ 363.
- Harman, Peter M. 1982. *Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge; Cambridge University Press.
- Harcup, G. 1988. *The War of Invention: Scientific Development, 1914 ~ 1918*. London; Brassey's Defense Publishes.
- Harwit, Martin. 1981. *Cosmic Discovery: The Search, Scope and Heritage of Astronomy*. New York; Basic Books.
- Hawking, Stephen W. 1988. *A Brief History of Time*. Toronto; Bantam Books.
- Hawking, Stephen W., and Werner Israel, eds. 1987. *Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge; Cambridge University Press.
- Hazen, Robert. 1988. *Breakthrough: The Race for the Superconductor*. New York; Summit Books.
- Hecht, Jeff. 1992. *Laser Pioneers*. Boston; Academic Press.
- Heilbron, John L. 1968. "The scattering of α and β particles and Rutherford's atom," AHES 4; 247 ~ 307.
- . 1977. "Lectures on the history of atomic physics 1900 ~ 1922," in Charles Weiner, ed. *History of Twentieth Century Physics*. New York; Academic Press, pp. 40 ~ 108.
- . 1981. "Rutherford-Bohr atom," AJP 49; 223 ~ 231.
- . 1982. "Fin-de-siècle physics," in C. G. Bernhard, et al., eds., *Science, Technology, and Society in the Time of Alfred Nobel*. New York; Pergamon Press. Pp. 51 ~ 73.
- . 1985. "The earliest missionaries of the Copenhagen spirit," RHS 38; 194 ~ 230.
- . 1986. *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck as Spokesman for German Science*. Berkeley; University of California Press.
- . 1992. "Creativity and big science," PT 45 (November); 42 ~ 47.
- Heilbron, John L., and Thomas S. Kuhn. 1969. "The genesis of the Bohr atom," HSPS 1: 211 ~ 290.
- Heilbron, John L., and Robert W. Seidel. 1989. *Lawrence and His Laboratory: A History of the Lawrence Berkeley Laboratory*. Vol. 1. Berkeley; University of California Press.

- Hendry, John. 1980. "Weimar culture and quantum causality," *History of Science* 18: 155 ~ 180.
- . 1984a. *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr-Pauli Dialogue*. Dordrecht, the Netherlands: Reidel.
- . ed. 1984b. *Cambridge Physics in the Thirties*. Bristol, England: Adam Hilger.
- . 1987. scientific origins of controlled fusion energy," *AS* 44: 143 ~ 168.
- Hendry, John, and J. D. Lawson. 1993. *Fusion Research in the UK 1945 ~ 1960*. AEA Technology.
- Hentschel, Klaus. 1990. *Interpretationen und Fehlinterpretationen der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins*. Basel: Birkhäuser.
- . 1992. "Einstein's attitude towards experiments: Testing relativity theory 1907 ~ 1927," *SHPS* 23: 593 ~ 624.
- . ed. 1996. *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources*. Basel: Birkhäuser.
- Hermann, Armin. 1971. *The Genesis of the Quantum Theory (1899 ~ 1913)*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Hermann, Armin, John Krieger, Dominique Pestre, and Ulrike Mersits, eds. 1987 ~ 1990. *History of CERN*. Vol. 1: *Launching the European Organization for Nuclear Research*. Vol. 2: *Building and Running the Laboratory*. New York: North-Holland.
- Hetherington, Norriss S., ed. 1993. *Encyclopedia of Cosmology: Historical, Philosophical, and Scientific Foundations of Modern Cosmology*. New York: Garland Publishing.
- Hewlett, Richard G. 1989. *Atoms for Peace and War 1953 ~ 1961*. Berkeley: University of California Press.
- Hewlett, Erwin N. 1971. "The energetics controversy and the new thermodynamics," in the D. H. D. Roller, ed., *Perspectives in the History of Science and Technology*. Norman: University of Oklahoma Press, pp. 67 ~ 86.
- . 1997. "The state of physics at the turn of the century," in Bunge and Shea, eds., pp. 3 ~ 22.
- Hillas, Anthony M., ed. 1972. *Cosmic Rays*. New York: Pergamon Press.
- Hirose, Tetu. 1976. "The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity," *HSPS* 7: 3 ~ 82.
- Hirose, Tetu, and Sigeko Nisio. 1986. "Rise and fall of various fields of physics at the turn of the century," *Japanese Studies in the History of science* 7: 93 ~ 113.
- Hochy, Paul K. 1983. "The reception of central European refugee physicists of the 1930s: USSR, UK, USA," *AS* 40: 217 ~ 246.
- Hoddeson, Lillian. 1981a. "The emergence of basic research in the Bell Telephone System, 1875 ~ 1915," *T&C* 22: 512 ~ 544.
- . 1981b. "The discovery of the point-contact transistor." *HSPS* 12: 41 ~ 76.
- . 1983. "Establishing KEK in Japan and Fermilab in the U. S.: Internationalism, nationalism, and



- high energy accelerators," *SSS* 13: 1 ~ 48.
- Hoddeson, Lillian, Gordon Baym, and Michael Eckert. 1992. "The development of quantum mechanics: electron theory of metals, 1926 ~ 1933," in Hoddeson et al., eds., pp. 88 ~ 181.
- Hoddeson, Lillian, et al., eds., 1992. *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid-State Physics*. New York: Oxford University Press.
- Hoddeson, Lillian, et al., eds., 1997. *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1860s and 1970s*. New York: Cambridge University Press.
- Hoffmann, Nanesh. 1972. *Albert Einstein: Creator and Rebel*. New York: Viking Press.
- Holloway, David. 1994. *Stalin and Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy 1939 ~ 1956*. New Haven: Yale University Press.
- Holton, Gerald. 1978. "Fermi's group and the recapture of Italy's place in physics," in G. Holton, *The Scientific Imagination: Case Studies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 1983. "The migration of physicists to the United States," in Jarrell C. Jackman and Carla M. Borden, eds., *The Muses Flee Hitler: Cultural Transfer and Adaption 1930 ~ 1945*. Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press, pp. 169 ~ 188.
- . 1988. *Thematic Origins of Scientific Thought, Kepler to Einstein*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- . 1994. *Science and Anti-Science*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Hoegan, John. 1996. *The End of Science*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Hovis, R., Corby, and Helge Kragh. 1991. "Resource letter HEPP-I: History of elementary-particle Physics," *AJP* 59: 779 ~ 807.
- Hufbauer, Karl. 1981. "Astronomers take up the stellar-energy problem, 1917 ~ 1920," *HSPS* 11: 277 ~ 303.
- Hund, Friedrich. 1974. *The History of Quantum Theory*. London: Harrap.
- Illy, József. 1981. "Revolutions in a revolution," *SHPS* 12: 173 ~ 210.
- Irvine, John, et al. 1986. "The shifting balance of power in experimental particle physics," *PT* 39 (November): 27 ~ 34.
- Irvine, John, and Ben R. Martin. 1985. "Basic research in the East and West: A comparison of the scientific performance of high energy physics accelerators," *SSS* 15: 293 ~ 341.
- Jammer, Max. 1961. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Cambridge, Mass.: Harvard University press.
- . 1966. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- . 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical perspective*. New York: Wiley-Interscience.

- Jungkenickel, Chrrista, and Russell McCormmach. 1986. *Intellectual Mastery of Nature: Theoretical Physics from Ohm to Einstein*. Volo. 2. Chicago: University of Chicago Press.
- Kaiser, Walter. 1987. "Early theories of the electron gas," *HSPS* 17; 271 ~ 297.
- Kangro, Hans. 1976. *Early History of Planck's Radiation Law*. London: Taylor & Francis.
- Kargon, Robert. 1982. *The Rise of Robert Millikan: Portrait of a Life in American Science*. Ithaca, N. Y. : Cornell University Press.
- Kayser, Heinrich. 1938. "Statistik der Spektroskopie," *Physikalische Zeitschrift* 39; 466 ~ 468.
- Kevles, Daniel J. 1971. "'Into hostile political camps': The reorganization of international science in World War I," *Isis* 62; 47 ~ 60.
- . 1976. "The physics, mathematics and chemistry communities: A comparative analysis," in A. Oleson and J. Voss, eds., *The organization of knowledge in Modern America, 1860 ~ 1920*. Baltimore: John Hopkins University Press. Pp. 139 ~ 179.
- . 1987. *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press.
- . 1997. "Big Science and big politics in the United States: Reflections on the death of the SSC and the life of the Human Genome Project," *HSPS* 27; 269 ~ 298.
- Kilmister, Clive W. 1994. *Eddington's Search for a Fundamental Theory: A Key to the University*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kirsten, Christa, and Hans-Jürgen Treder, eds. , 1979. *Albert Einstein in Berlin 1913 ~ 1933*. 2 vols. Berlin : Akademie - Verlag.
- Klein, Martin J. 1966. "Thermodynamics angquanta in Planck's work," *PT* 19 (November): 23 ~ 32. Reprinted in Weart and Phillips, eds. , 1985, pp. 294 ~ 302.
- . 1970. *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*. Amsteden: North-Holland.
- . 1973. "Mechanical explanation at the end of the nineteenth century," *Centaurus* 17; 58 ~ 82.
- Kleinert, Andreas. 1978. "Von der science allemande zur deutschen Physik," *Francia* 8; 509 ~ 525.
- Koester, David, Daniel Sullivan, and D. Hywel White. 1982. "Theory selection in particle physics: A quantitative case study of the evolution of weak-electromagnetic unification theory," *SSS* 12; 73 ~ 100.
- Koizumi, K. 1975. "The emirgence of Japan's first physicists," *HSPS* 6; 3 ~ 108.
- Kojevnikov, Alexei B. 1991. "Priotr Kapitza and Stalin's government: A study in moral choice," *HSPS* 22; 131 ~ 164.
- Kojevnikov, Alexei B. , and O. I. Novik. 1989. "Analysis of informational ties dynamics in eearly quantum mechanics (1925 ~ 1927)," *Acta Historiae Rerum Naturalium Necnon Technicarum*, No. 20; 115 ~ 160.
- Kolb, Adrienne, and Lillian Hoddeson. 1993. "The mirage of the 'world accelerator for the world peace'



- and the origins of the WWC, 1953 ~ 1983," *HSPS* 24: 101 ~ 124.
- Konuma, Michiji. 1989. "Social aspects of Japanese particle physics in the 1930s," in Brown, Dresden, and Hoddeson, eds., pp. 536 ~ 550.
- Kraft, Fritz. 1983. "Internal and external conditions for the discovery of fission by the Berlin team," in Shea, ed., pp. 135 ~ 166.
- Kraft, P., and P. Kroes. 1984. "Adaption of scientific knowledge to an intellectual environment: Paul Forman's 'weimar culture, causality, and quantum theory, 1918 ~ 1927': Analysis and criticism," *Centauros* 27: 76 ~ 99.
- Kragh, Helge. 1979. "Niels Bohr's second atomic theory," *HSPS* 10: 123 ~ 186.
- . 1980a. Anatomy of a priority conflict: The case of element 72," *Centauros* 23: 275 ~ 301.
- . 1980b. *On Science and Underdevelopment*. Roskilde, Denmark: RUC Forlag.
- . 1981a. "The genesis of Dirac's relativistic theory of electrons," *AHES* 24: 31 ~ 67.
- . 1981b. "The concept of the monopole: A historical and analytical case-study," *SHPS* 12: 141 ~ 172.
- . 1982a. "Cosmo-physics in the thirties: Towards a history of Dirac cosmology," *HSPS* 13: 70 ~ 108.
- . 1982b. "Erwin Schrödinger and the wave equation: The crucial phase," *Centauros* 26: 154 ~ 197.
- . 1985. "The fine structure of hydrogen and the gross structure of the physics community, 1916 ~ 1926," *HSPS* 16: 67 ~ 125.
- . 1989a. "The aether in late nineteenth century chemistry," *Ambix* 36: 49 ~ 65.
- . 1989b. "Concept and controversy: Jean Becquerel and the positive electron," *Centauros* 32: 203 ~ 240.
- . 1990. *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 1992. "Relativistic collisions: The work of Christian møller in the early 1930s," *AHES* 43: 299 ~ 328.
- . 1994. "The Kranup cable: Invention and early development," *T&C* 35: 129 ~ 157.
- . 1995. "Arthur March, Werner Heisenberg, and the search for a smallest length," *RHS* 48: 401 ~ 434.
- . 1996a. "The new rays and the failed anti-materialistic revolution," in Dieter Hoffmann, Fabio Bevilacqua, and Roger Stuewer, eds., *The Emergence of modern Physics*. Pavia, Italy: La Goliardica Pavese. pp. 61 ~ 78.
- . 1996b. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- . 1997a. "The origin of radioactivity: From solvable problem to unsolved non-problem," *AHES* 50: 331 ~ 358.

- . 1997b. "J. J. Thomson, the electron, and atomic architecture," *The physics Teacher* 35: 328 ~ 332.
- . 1997c. "The electrical universe: Grand cosmological theory versus mundane experiments," *PS* 5: 199 ~ 231.
- Kragh, Helge, and Brunon Carazza. 1994. "From time atomics to space-time quantization: The idea of discrete time, ca. 1925 ~ 1936," *SHPS* 25: 437 ~ 462.
- Krige, John, ed. 1996. *History of CERN*. Vol. 3. Amsterdam: Elsevier.
- Kuhn, Thomas. 1978. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894 ~ 1912*. Oxford: Clarendon Press.
- Larmor, Joseph. 1900. *Aether and Matter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 1927. *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press.
- LeBon, Gustave. 1905. *The Evolution of Matter*. New York: Charles Scribner's Sons.
- Lee, T.-S. H. and R. B. Wiringa, eds. 1990. *Proceedings of a Symposium on the Occasion of the 40th Anniversary of the Nuclear Shell Model*. (Special issue of *Nuclear physics A* 507, 1 ~ 321).
- Levy-Leblond, Jean-Marc. 1976. "Ideology of/in contemporary physics." in Hiary Rose and Steven Rose, eds. *The Radicalisation of Science*. London: Macmillan, pp. 136 ~ 175.
- Lightman, Alan, and Roberta Brawer, eds. 1990. *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Lindqvist, Svante, ed. 1993. *Center on the Periphery: Historical Aspects of 20th-Century Swedish Physics*. Canton, Mass.: Science History Publications.
- Lorentz, Hendrik A. 1952. *The Theory of Electrons*. New York: Dover Publications.
- Ludwing, Gunther, ed. 1968. *Wave Mechanics*. New York: Pergamon Press.
- MacKinnon, Edward M. 1982. *Scientific Explanation and Atomic Physics*. Chicago: Chicago University Press.
- MacLeod, Roy. 1982. "The 'balance of science' debate: The creed of science and its critics, 1885 ~ 1900," *Science, Technology, & Human Values* 7: 2 ~ 15.
- Mann, Alfred K., and David B. Cline, eds. 1994. *Discovery of Weak Neutral Currents: The Weak Interaction Before and After*. New York: AIP Press.
- Martins, Roberto de Andrade. 1997. "Becquerel and the choice of uranium compounds," *AHES* 51: 67 ~ 81.
- Mayer-kuckuk, Theo, ed. 1995. *150 Jahre Deutsche Physikalische Gesellschaft*. Weinheim, Germany: VCH Verlagsgesellschaft.
- McCormach, Russell. 1966. "The atomic theory of John William Nicholson," *AHES* 3: 160 ~ 184.
- . 1970. "H. A. Lorentz and the electromagnetic world view of nature," *Isis* 61: 459 ~ 497.



- Mehra, Jagdish. 1974. *Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation*. Dordrecht, the Netherlands; Reidel.
- . 1975. *The Solvay Conferences on Physics: Aspects of the Development of Physics Since 1911*. Dordrecht, the Netherlands; Reidel.
- . 1994. *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman*. New York; Oxford University press.
- Mehra, Jagdish, and Helmut Rechenberg. 1982. *The Historical Development of Quantum Theory*. Vols. 1-4. Berlin; Springer-Verlag.
- . 1987. *The Historical Development of Quantum Theory*. Vol. 5. Berlin; Springer-Verlag.
- Menrtens, Herbert, and Steffens Richter, eds. 1980. *Naturwissenschaft, Technik und NS-Ideologie*. Frankfurt am Main; Suhrkamp.
- Menard, Henry W. 1971. *Science: Growth and Change*. Cambridge, Mass; Harvard University Press.
- Mendelssohn, Kurt. 1977. *The Quest for Absolute Zero*. London; Taylor & Francis.
- Metron, Robert K. 1973. *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*. Chicago; University of Chicago Press.
- Michelson, Albert. 1902. *Light Waves and Their Uses*. Chicago; University of Chicago Press.
- Miller Arthur I. 1981. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*. London; Addison-Wesley.
- . 1986. *Frontiers of Physics: 1900-1911. Selected Essays*. Boston; Birkhäuser.
- Millikan, Robert A. 1951. *The Autobiography of Robert A. Millikan*. London; Mac-Donald.
- Millikan, Robert A. 1951. *The Autobiography of Robert A. Millikan*. London; Mac-Donald.
- Mladjenovic, Milovad. 1998. *The Defining Years in Nuclear Physics. 1932-1960s*. Bristol, England; Institute of Physics Publishing.
- Moore, Walter. 1989. *Schrodinger: Life and Thought*. Cambridge; Cambridge University Press.
- Moravcsik, Michael J. 1977. "The crisis in particle physics," *Research Policy* 6; 78-107.
- Morrison, Philip. 1946. "The laboratory demobilizes," *Bulletin of the Atomic Scientists* 2 (November); 5-6.
- Moyer, D. F. 1981. "Origins of Dirac's electron," *AJP* 49; 944-949.
- Nakayama, Shigeru, David L. Swain, and Eri Yagi, eds. 1974. *Science and Society in Modern Japan*. Cambridge, Mass; MIT Press.
- Nersessian, Nancy J. 1986. "Why wasn't Lorentz Einstein: An examination of the scientific method of H. A. Lorentz," *Centaurus* 29; 37-73.
- Newman, Harvey B., and Thomas Ypsilantis, eds. 1996. *History of Original Ideas and basic Discoveries in Particle Physics*. New York; Plenum press.
- Nicolai, Georg. 1981. *The Biology of War*. New York; Century.
- [Nobel] 1967-1997. *Nobel Lectures. Physics*. Vols. 1-4. Amsterdam; Elsevier. Vols. 5-7. Singapore;

- World Scientific.
- Norton, John. 1985. "How Einstein found his field equations; 1912 ~ 1915," *HSPS* 14: 253 ~ 316.
- Nowtny, Helga, and Hilary Rose. eds. 1979. *Counter-Movements in the Sciences*. Dordrecht, the Netherlands; Reidel.
- Nye, Mary Jo. 1974. "Gustave LeBon's black light: A study of physics and philosophy in France at the turn of the century," *HSPS* 4: 163 ~ 195.
- . 1975. "The nineteenth-century atomic debates and the dilemma of an 'indifferent hypothesis'," *SHPS* 7: 245 ~ 268.
- . 1980. "N-rays: An episode in the history and psychology of science", *HSPS* 11: 125 ~ 156.
- , ed. 1984. *The Question of the Atom from the Karlsruhe Congress to the first Solvay Conference, 1860 ~ 1911*. Los Angeles: Tomash.
- . 1993. *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry: Dynamics of Matter and Dynamics of Disciplines 1800 ~ 1950*. Berkeley: University of California press.
- Olby, Robert, 1994. *The Path to the Double Helix; The Discovery of DNA*. New York: Plenum Press.
- Pais, Abraham. 1982. "Subtle is the Lord, ...": *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University press.
- . 1986. *Inward Bound; Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford: Clarendon press.
- . 1991. *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*, Oxford: Clarendon press.
- Panofsky, Wolfgang, 1994. *Particles, and Policy*, Woodbury, N, Y; AIP Press.
- Pickering, Andrew. 1981, "The hunting of quark," *Isis* 72: 216 ~ 236.
- . 1984a. *Constructing Quarks; A Sociological History of Particle Physics*. Edinburgh: Edinburgh University press.
- . 1984b. "Against putting the phenomena first; the discovery of the weak neutral current," *SHPS* 15: 85 ~ 117.
- Pinch, Trevor J. 1977. "What does a proof do if it does not prove?" in E. Mendelsohn, P. Weingart, and R. Whitley, eds., *The Social Production of Scientific Knowledge*. Dordrecht, the Netherlands; Reidel, pp. 171 ~ 215.
- Post, Richard F. 1995. "Plasma physics in the twentieth century," in Brown, Pais, and Pippard eds., pp. 1617 ~ 1690.
- Powers, Thomas. 1993. *Heisenberg's War: The Secret History of the German Bomb*. New York: Knopf.
- Purinton, Robert D. 1997. *Physics in the Nineteenth Century*. New Brunswick, N. J.; Rutgers University press.
- Pyenson, Lewis. 1979. "Mathematics, education, and the Gottingen approach to physical reality, 1890 ~ 1914," *Europa* 2: 91 ~ 128.



- Pyenson, Lewis, and Douglas Skopp. 1997. "Educating physicists in Germany circa 1900," *SSS* 7:329 ~ 366.
- Redhead, Paul A., ed. 1994. *Vacuum Science and Technology: Pioneers of the 20th Century*. New York: AIP Press.
- Reich, Leonard. 1983. "Erving Langmuir and the pursuit of science and technology in the corporate environment," *T&C* 24: 199 ~ 221.
- . 1985. *The Making of American Industrial Research: Science and Business at GE and Bell, 1876 - 1926*. New York: Cambridge University Press.
- Reingold, Nathan, and Ilda Reingold, eds. 1981. *Science in America: A Documentary History 1900 - 1939*. Chicago: University of Chicago Press.
- Renneberg, Monika, and Mark Walker, eds. 1994. *Science, Technology and National Socialism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rescher, Nicholas. 1978. *Scientific Progress*. Oxford: Blackwell.
- Rhodes, Richard. 1986. *The Making of the Atomic Bomb*. New York: Simon and Schuster.
- . 1995. *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb*. New York: Simon and Schuster.
- . 1995. "Physicists to Britain and the United States, 1933 - 1945," *HSPS* 15: 107 ~ 176.
- Riordan, Michael. 1987. *The Hunting of the Quark: A True Story of Modern Physics*. New York: Simon & Schuster.
- Riordan, Michael, and Lillian Hoddeson. 1997. *Crystal Fire: The Birth of the Information Age*. New York: Norton.
- Robertson, Peter. 1979. *The Early Years: The Niels Bohr Institute 1921 - 1930*. Copenhagen: Akademisk Forlag.
- Roque, Xavier. 1997a. "The manufacture of the positron," *SHPMP* 28: 73 ~ 129.
- . 1997b. "Marie Curie and the radium industry: A preliminary sketch," *History and Technology* 13: 267 ~ 292.
- Rosenthal-Schneider, Ilse. 1980. *Reality and Scientific Truth: Discussions With Einstein, von Laue and Planck*. Detroit: Wayne State University Press.
- Roseveare, N. T. 1982. *Mercury's Perihelion from Le Verrier to Einstein*. Oxford: Clarendon Press.
- Rothman, Tony, and George Ellis. 1987. "Has cosmology become metaphysical?" *Astronomy* 15 (February): 6 ~ 22.
- Rowlands, Henry, . 1902. *The Physical Papers of Henry Augustus Rowland*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Rueger, Alexander. 1988. "Atomism from cosmology: Erwin Schrödinger's work on wave mechanics and space-time structure," *HSPS* 18: 377 ~ 401.

- . 1992. "Attitudes towards infinities: Responds to anomalies in quantum electrodynamics, 1927 ~ 1947," *HSPS* 22; 309 ~ 338.
- Russo, Arturo. 1981. "Fundamental reesearch at Bell Laboratories: The discovery of electron diffraction," *HSPS* 12; 117 ~ 160.
- Ryan, M. P., and L. C. Shepler. 1976. "Resource letter RC-1; Cosmology," *AJP* 44; 223 ~ 230.
- Sánchez-Ron, José. 1987. "The reception of special relativity in Great Britain," in Glick, ed., pp. 27 ~ 58.
- . 1992. "The reception of general relativity among British phisicisits and mathematicians (1915 ~ 1930)," in Eisenstaedt and Kox, eds., pp. 57 ~ 88.
- Schilpp, Paul A., ed. 1949. *Albert Einstein; Philosopher-Scientist*. Evanston, III.; Library of Living Philosophers.
- Schramm, David N. 1991. *The Big Bang and Other Edxplosions in Nulear and Particle Astrophysics*. Singapore; World Scientific.
- Schramm, David N., and Gary Steigman. 1988. "Particle accelerators test cosmological theory," *Scientific American* 262 (June); 66 ~ 72.
- Schröder-Gudehus, Brigitte. 1966. *Deutsche Wissenschaft und Internationale Zusammenarbeit 1914 ~ 1928*. Geneva; Dumaret & Golay.
- . 1972. "The augument for the self-government and public support of science in Weimar Germany," *Minerva* 10; 537 ~ 570.
- . 1978. *Les Scientifiques et la Paix; La Communauté Scientifique Internationale au Cours des Années 20*. Montréal; Presses de l' Université de Montréal.
- Schwarz, John H. 1996. "Superstring—a brief history," in Newman and Ypsilantis, eds., p-p. 695 ~ 706.
- Schweber, Sylvan S. 1988. "The muture embrace of science and the military: ONR and the growth of physics in the United States after World War II," in E. Mendelsohn, M. R. Smith, and P. Weingart, eds., *Science, Technology and the Military*. Dordrecht, the Netherland; Kluwer, pp. 1 ~ 45.
- . 1989. "Some reflections on the history of particle physics in the 1950s," in Brown, Dresden, and Hoddeson, eds., pp. 668 ~ 693.
- . 1990. "The young John Clarke Slater and the development of quantum chemistry," *HSPS* 20; 339 ~ 406.
- . 1994a. *QED and the Men Who Made It: Dysdon, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton, N. J.; Princeton University Press.
- . 1994b. "Some reflections on big science and high energy physics in United States," *RSS* 2; 127 ~ 189.



- . 1995. "Physics, community and the crisis in physical theory," in Kostas Gavroglu, John Stachel and Marx W. Wartofsky, eds., *Physics, Philosophy and the Scientific Community*. Dordrecht, the Netherlands; Kluwer Academic, pp. 125 ~ 152.
- . 1997. "A historical perspective on the rise of the standard model," in Hoddeson et al. eds., pp. 645 ~ 684.
- Schwinger, Julian, ed. 1958. *Selected Papers on Quantum Electrodynamics*. New York: Dover Publications.
- Scurlock, Ralph G., ed. 1992. *History and Origins of Cryogenics*. Oxford: Clarendon Press.
- Segré, Emilio. 1970. *Enrico Fermi: Physicist*. Chicago: University of Chicago Press.
- . 1980. *From X-rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries*. San Francisco: W. H. Freeman and Co.
- Seber, Robert. 1992. *The Los Alamos Primer. The First Lectures on How to Build on Atomic Bomb*. University of California Press.
- Shea, William R., 1983. *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics*. Dordrecht, the Netherlands; Reidel.
- Siegel, Daniel M. 1987. "Classical electromagnetic and relativistic approaches to the problem of nonintegral atomic masses," *HSPS* 9: 323 ~ 360.
- Sime, Ruth I. 1996. *Lise Meitner: A Life in Physics*. Berkeley: University of California.
- Simmons, John. 1997. *The 100 Most Influential Scientists*. London: Robinson.
- Sinclair, S. B. 1987. "J. J. Thomson and the chemical atom: From ether vortex to atomic decay," *Ambix* 34: 89 ~ 116.
- Smith, Alice K., and Charles Weiner, eds. 1980. *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Smits, F. M., ed. 1985. *A History of Engineering and Science in the Bell System; Electronics Technology (1925 ~ 1975)*. Murray Hill, N. J.: Bell Telephone Laboratories.
- Smyth, Henry. 1945. *Atomic Energy for Military Purposes*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- Sopka, Katherine R. 1988. *Quantum Physics in America, 1920 ~ 1935*. New York: Arno Press.
- Sopka, Katherine R., and Albert E. Moyer, eds. 1986. *Physics for a New Century: Papers Presented at the 1904 St. Louis Congress*. New York: American Institute of Physics.
- Stehle, Philip. 1994. *Order, Chaos, Order: The Transition from Classical to Quantum Physics*. New York: Oxford University Press.
- Stern, Alexander W. 1964. "The third revolution in 20th century physics," *PT* 17 (April): 42 ~ 45.
- Stuewer, Roger H. 1975. *The Compton Effect: Turning Point in Physics*. New York: Science History.
- . ed. 1979. *Nuclear Physics in Retrospect: Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- . 1983. "The nuclear electron hypothesis," in Shea, ed. pp. 19 ~ 68.

- . 1984. "Nuclear physicists in a new world: The emigrés of the 1930s in America," *BW* 7: 23 ~ 40.
- . 1985a. "Artificial disintegration and the Cambridge-Vienna controversy," in Peter Achinstein and Owen Hannaway, eds., *Observation, Experiment, and Hypothesis in Modern Physical Science*. Cambridge, Mass.: MIT Press. pp. 239 ~ 307.
- . 1985b. "Bringing the news of fission to America," *PT* 38 (November): 48 ~ 56.
- . 1986a. "Rutherford's satellite model of the nucleus," *HSPS* 16: 321 ~ 352.
- . 1986b. "Gamow's theory of alpha-decay," in E. Ullmann-Margalit, ed., *The Kaleidoscope of Science*. Dordrecht, the Netherlands: Reidel, pp. 147 ~ 186.
- . 1986c. "The naming of the deuteron," *AJP* 54: 206 ~ 218.
- . 1984. "The origin of the liquid-drop model and the interpretation of nuclear fission," *PS* 2: 76 ~ 129.
- ter Haar, Dirk, ed. 1967. *The Old Quantum Theory*. London: Pergamon Press.
- Thomson, J. J. 1896. "The Röntgen rays," *Nature* 54: 302 ~ 306.
- Thorne, Kip S. 1994. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: Norton.
- Trefil, James S. 1983. *Landmark Experiments in Twentieth Century Physics*. New York: Dover Publications.
- Tyne, Gerard. 1977. *Saga of the Vacuum Tube*. Indianapolis: H. W. Sams & Co.
- Urani, J., and George Gale. 1993. "E. A. Milne and the origins of modern cosmology: An essential presence," in John Earman, Michel Janssen, and John D. Norton, eds., *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity*. Boston: Birkhäuser, pp. 390 ~ 419.
- Van der Waerden, Bartel L., ed. 1967. *Sources of Quantum Mechanics*. New York: Dover Publications.
- Vizgin, Vladimir P. 1994. *Unified Field Theories in the First Third of the 20th century*. Basel: Birkhäuser.
- Vlachy, Jan. 1982. "World publication output in particle physics," *Czechoslovakian Journal of Physics* B32: 1065 ~ 1072.
- Vucinich, Alexander. 1980. "Soviet physicists and philosophers in the 1930s: Dynamics of a conflict," *Isis* 71: 236 ~ 250.
- Walker, Mark. 1995. *Nazi Science: Myth, Truth and the German Atomic Bomb*. New York: Plenum.
- Wang, Zuoyue. 1995. "The politics of big science in the Cold War: PSAC and the funding of SLAC," *HSPS* 25: 329 ~ 356.
- Wasserman, Neil. 1985. *From Invention to Innovation: Long-Distance Telephone Transmission at the Turn of the Century*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Warkins, Peter. 1986. *Story of the W and Z*. New York: Cambridge University Press.
- Weart, Spencer R. 1976a. "The rise of 'prostituted' physics," *Nature* 262: 13 ~ 17.
- . 1976b. "Scientists with a secret," *PT* 29 (February): 23 ~ 30. Reprinted in Weart and Phillip,



- eds. , pp. 123 ~ 129.
- . 1979a. "The physics business in America 1919 ~ 1940: A statistical reconnaissance," in Nathan Reigold, ed. , *The Sciences in the American Context: New Perspectives*, Washington, D. C. : Smithsonian Institution Press, pp. 295 ~ 328.
- . 1979b. *Scientists in Power*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press.
- . 1983. "The discovery of fission and a nuclear physics paradigm," in Shea, ed. , pp. 91 ~ 134.
- . 1992. "The solid community," in Hoddeson et al. , eds. , pp. 617 ~ 668.
- Weart, Spencer R. and Melba Phillips. Eds. 1985. *History of Physics: Readings from Physics Today*, New York: American Institute of Physics.
- Weeks, Mary E. 1968. Discovery of the Elements. Easton. Pa. : Journal of Chemical Education.
- Weinberg, Alvin. 1967. *Reflections on Big Science*. Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Weinberg, Steven. 1977. "The search for unity: Notes for a history of quantum field theory," *Daedalus* 106 (April): 17 ~ 35.
- . 1993. *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*. New York: Vintage Books.
- Weiner, Charles. 1969. "A new site for the seminar: The refugees and American physics in the thirties," in Donald Fleming and Bernard Bailyn. Eds. , *The Intellectual Migration: Europe and America, 1930 ~ 1960*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press, pp. 190 ~ 234.
- . 1970. "Physics in the great depression," *PT* 23 (January): 31 ~ 38. Reprinted in Weart and Phillips, eds. , pp. 115 ~ 121.
- . 1972. "1932—Moving into the new physics," *PT* 25 (May): 40 ~ 49.
- Wheaton, Bruce R. 1983. *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wheeler, John A. , and W. H. Zurek. Eds. , 1983. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton, N. J. : Princeton University Press.
- Whitaker, Andrew. 1996. *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. Cambridge: Cambridge University Press.
- White, D. Hywel, Daniel Sullivan, and Edward J. Barboni. 1979. "The interdependence of theory and experiment in revolutionary science: The case of parity violation," *SSS* 9: 303 ~ 327.
- Whitehead, Alfred N. 1925. *Science and Modern World*. New York: Macmillan.
- Widmalm, Sven. 1995. "Science and neutrality: The Nobel Prizes of 1919 and scientific internationalism in Sweden," *Minerva* 33: 339 ~ 360.
- Wilcox, Robert K. 1985. *Japan's Secret War: Japan's Race Against Time to Build its Own Atomic Bomb*. New York: William Morris and Company.

- Will, Clifford M. 1993. *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*. Oxford University Press.
- Williams, L. Pearce, ed. 1968. *Relativity Theory: Its Impact on Modern Thought*. New York: John Wiley & Sons.
- Wilson, David. 1983. *Rutherford: Simple Genius*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Wohlfarth, Horst. 1979. *40 Jahre Kernspaltung: Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt, Germany: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Wynne, Brian. 1979. "Physics and Psychics: Science, symbolic action, and social control in late victorian England," in Barry Barnes and Steven Shapin, eds., *Natural Order: Historical Studies of Scientific Culture*. Beverly Hills, Calif.: Sage Publications, pp. 167 ~ 190.
- Xu, Qiaozhen, and Laurie Brown. 1987. "The early history of cosmic ray research," *AJP* 55: 23 ~ 33.
- Yaes, Robert. 1974. "Physics fads and finance," *NS* 858: 462 ~ 463.
- Yang, Chen Ning. 1989. "Particle physics in the early 1950s," in Brown, Dresden, and Hoddeson, eds., pp. 40 ~ 47.
- Yolton, John W. 1960. *The Philosophy of Science of A. S. Eddington*. The Hague: Martinus Nijhoff.
- Zee, A., ed. 1982. *Unity of Forces in the Universe*. 2 vols. Singapore: World Scientific.

附 录 人名索引

A

Abelson, Philip 菲力普·阿贝尔森
 Abraham, Max 马克思·阿布拉汉姆
 Albrecht, Andreas 安德赖斯·阿乐布雷特
 Alfvén, Hannes 罕尼斯·阿尔文
 Alpher, Ralph 拉尔夫·阿尔弗
 Alvarez, Luis 路易斯·阿尔瓦瑞兹
 Amaldi, Edoardo 埃多阿多·阿马尔迪
 Ambarzumian, Victor 维克托·阿姆巴朱米安
 Ampère, André - Marie 安德雷-马里·安培
 Anderson, Carl 卡尔·安德逊
 Anderson, David 戴维·安德逊
 Anderson, Philip 菲力普·安德逊
 Araki, Toshima 托西马·阿赖基
 Arnold, Harold 哈罗尔德·阿诺尔德
 Arrhenius, Svente 斯范特·阿亨尼尔斯
 Artsimpvich, Lev 列夫·阿兹姆普维奇
 Aston, Francis 弗兰西斯·阿斯顿
 Atkinson, Robert d' Escourt 罗伯特·德
 斯科特·阿特金森
 Atterling, Hugo 惠格·阿特林
 Auger, Pierre 皮尔·奥格

B

Bachem, Albert 阿尔伯特·巴杰姆
 Bacher, Rober 罗伯·巴彻
 Back, Ernst 恩斯特·巴克
 Bakker, Cornelis 科尼里斯·巴克
 Bardecem, John 约翰·巴丁
 Barkla, Charles 查尔斯·巴克拉
 Basov, Nikolai 尼可拉·巴索夫
 Bauer, Edmond 埃德蒙德·鲍尔
 Beck, Guido 盖多·贝克
 Becker, Herbert 赫伯特·贝克
 Becquerel, Edmond 埃德蒙德·贝克勒尔
 Becquerel, Henri 亨利·贝克勒尔
 Becquerel, Jean 吉恩·贝克勒尔
 Bednorz, J. George 乔治·柏德诺兹
 Bell, Jocelyn 乔斯林·贝尔
 Bell, John 约翰·贝尔
 Bell, Laboratories L·贝尔
 Bell, System 西斯特姆·贝尔
 Bergmann, Peter 彼特·伯格曼
 Bernal, John 约翰·伯纳尔
 Bernardini, Gilberto 吉尔伯托·伯纳狄尼

Bethe, Hans 汉斯·贝特
 Bhabha, Homi 霍米·巴布哈
 Birtwistle, George 乔治·贝特维斯托
 Bishop, Amasa 阿马沙·比绍普
 Bjerknes, Carl A. 卡尔·布杰尔尼斯
 Bjerrum, Niels 尼尔斯·布杰尔鲁姆
 Bjorken, James 詹姆士·布约肯
 Blackett, Patrick M. S. 帕物里克·布莱克特
 Blau, Marietta 马里塔·布劳
 Bloch, Felix 费里克斯·布洛赫
 Bloembergen, Nicolaas 尼古拉斯·布洛姆伯根
 Blokhintsev, Dmitri 德米特里·布洛欣采夫
 Blondlot, René 瑞内·布朗德罗特
 Bohr, Aage 阿吉·玻尔
 Bohr, Niels 尼尔斯·玻尔
 Boltzmann, Ludwig 路德维希·玻尔兹曼
 Bondi, Hermann 厄曼·邦迪
 Bopp, Fritz 弗里兹·鲍普
 Born, Max 马克思·玻恩
 Bothe, Walther 沃尔特·博特
 Bragg, William H. 威廉·H·布拉格
 Bragg, William L. 威廉·L·布拉格
 Brans, Carl 卡尔·布朗斯
 Braun, Ferdinand 费尔迪纳德·布朗
 Breisig, Franz 弗朗兹·布列斯格
 Breit, Gregory 格瑞哥里·布莱特
 Brickwedde, Ferdinand 费尔迪纳德·布里克维迪
 Bridgman, Percy 佩斯·布里奇曼
 Brillouin, Léon 里昂·布里渊
 Brillouin, Marcel 马瑟尔·布里渊
 Brittain, Walter 沃尔特·布里藤
 Bronstein, Matvei 马特维·布朗斯坦
 Brout, Robert 罗伯特·布罗特
 Brush, Charles 查尔斯·布拉西
 Bucherer, Adolf 阿多尔夫·布彻勒

Buckley, Oliver 奥里弗·布克莱
 Buhl, Alfons 阿尔范斯·比尔
 Burbidge, Geoffrey 乔夫瑞·伯比吉
 Burbidge, Margaret 马格瑞特·伯比吉
 Bursian, Viktor 维克多·伯斯安
 Bush, Vannevar 范尼瓦·布什
 Butler, Clifford 克里弗德·布特勒

C

Cabrera, Blas 布拉斯·卡布瑞拉
 Cailletet, Louis 路易斯·开勒忒特
 Campbell, George 乔治·坎普贝尔
 Campbell, Norman 诺曼·坎普贝尔
 Carnegie, Andrew 安德里·卡尼奇
 Carty, John 约翰·卡提
 Casimir, Hendrik 亨德里克·卡什米尔
 Chadwick, James 詹姆斯·查德威克
 Chamberlain, Owen 欧文·钱伯莱因
 Champion, Frand 弗朗德·坎姆皮昂
 Chappe, Claude 克劳德·查皮
 Chew, Geoffrey 乔弗瑞·丘
 Christenson, Jim 吉姆·奇里斯登森
 Claude, George 乔治·克劳德
 Clausius, Rudolf 鲁道尔夫·克劳修斯
 Clifford, William K. 威廉·克里弗德
 Cockroft, John D. 约翰·科克罗夫
 Cohn, Emil 埃米尔·科恩
 Coleman, Sidney 斯德尼·科尔曼
 Compton, Arthur 阿瑟·康普顿
 Condon, Edward 爱德华·康顿
 Conversi, Marcello 马瑟罗·康弗斯
 Coolidge, William 威廉·库里吉
 Cooper, Leon 里昂·库柏
 Corbino, Orso Maria 欧索·马利亚·科宾诺
 Corson, Dale 德尔·克森
 Coster, Dirk 德克·科斯特



Courant, Richard 理查德·克朗特
 Cowan, Clyde 克莱德·科万
 Crick, Francis 弗朗西斯·克里克
 Critchfield, Charles 查尔斯·克里奇菲尔德
 Cronin, James 詹姆斯·克朗宁
 Crookes, William 威廉·克鲁克斯
 Crouch, M. F. 克罗奇
 Cunningham, Ebenezer 埃本尼泽·坎宁哈姆
 Curie, Irène 伊瑞妮·居里
 Curie, Marie 玛丽·居里
 Curie, Pierre 皮埃尔·居里

D

D'Agostino, Oscar 奥斯卡·达哥斯蒂诺
 Dalitz, Richard 里查德·达里兹
 Dancoff, Sidney 悉尼·丹科夫
 Darrow, Karl 卡尔·达罗
 Darwin, Charles 查理斯·达尔文
 Davisson, Clinton J. 克林顿·戴维逊
 Davydov, B. I. 达维多夫
 De Forest, Lee 李·德福雷斯特
 Debye, Peter 彼特·德拜
 Delbrück, Max 马克思·德尔布鲁克
 Dennison, David 戴维·丹尼逊
 Dewar, James 詹姆斯·杜瓦
 De Witt, Bryce 布拉斯·德韦特
 Dicke, Robert 罗伯特·狄克
 Dingle, Herbert 赫伯特·丁格尔
 Dingler, Hugo 惠哥·丁格勒
 Dirac, Paul 保尔·狄拉克
 Dolezalek, Friedrich 弗里德里希·多勒泽勒克
 Dorsman, Cornelis 科尼利斯·多斯曼
 Drude, Paul 保尔·德鲁德
 Duggan, Stephen 斯蒂芬·杜冈
 Duhem, Pierre 皮尔·杜罕
 Dunning, John 约翰·邓宁

Dushman, Saul 绍尔·杜什曼
 Dyson, Frank 弗兰克·戴逊
 Dyson, Freeman 弗里曼·戴逊

E

Ebeling, August 奥格斯特·埃贝林
 Eckart, Carl 卡尔·埃卡特
 Eddington, Arthur 阿瑟·爱丁顿
 Edison, Thomas A. 托马斯·爱迪生
 Ehrenfest, Paul 保尔·埃伦费斯特
 Ehrehaft, Felix 费利克斯·埃伦哈夫特
 Einstein, Albert 阿尔伯特·爱因斯坦
 Ellis, Charles 查尔斯·埃利斯
 Elmen, Gustaf 嘎斯塔夫·埃尔门
 Elsasser, Walter 沃尔特·埃尔萨瑟
 Englert, Francois 弗朗科易斯·恩格勒特
 Epstein, Paul 保尔·埃普斯坦
 Epinus, Franz 弗兰兹·埃皮纳斯
 Euler, Hans 汉斯·欧拉

F

Fairbank, William 威廉·菲尔邦克
 Faraday, Michael 迈克·法拉第
 Farkas, Ladislaus 拉迪斯劳斯·法卡斯
 Feather, Norman 诺曼·菲瑟
 Feenberg, Eugene 尤金·菲恩伯格
 Fermi, Enrico 恩里科·费米
 Feyerabend, Paul 保尔·费耶阿本德
 Feynman, Richard 理查德·费曼
 Fitch, Val 瓦尔·菲奇
 FitzGerald, George 乔治·菲兹杰拉德
 Flaming, John A. 约翰·菲拉明
 Flerov, Georgii 乔治·弗勒罗夫
 Flint, Henry 亨利·弗林特
 Fock, Vladimir A. 弗拉季米尔·福克
 Follin, James 詹姆斯·弗林

föppl, August 奥古斯特·弗普尔
 föppl, Ludwig 路德维西·弗普尔
 Forman, Paul 保尔·弗曼
 Fowler, Alfred 阿尔弗雷德·弗勒
 Fowler, Ralph 拉尔夫·弗勒
 Fowler, William 威廉·福勒
 Fracnk, Jack 杰克·弗朗克
 Fanck, James 詹姆斯·弗朗克
 Freedman, Daniel 丹尼尔·弗里德曼
 French, Bruce 布鲁斯·弗伦奇
 Frenkel, Yakov 亚可夫·弗伦克尔
 Fresnel, Augustin 奥格斯汀·菲涅尔
 Freundlich, Erwin 埃尔文·弗伦德利希
 Friedmn, Jerome 杰罗姆·弗里德恩
 Friedmann, Alexander 亚历山大·弗里德曼
 Friedrich, Walter 沃尔特·弗里德利希
 Frisch, Otto 奥托·弗里什
 Fuchs, Klaus 克劳斯·弗奇斯
 Furry, Wendell 温德尔·弗里
 Fürth, Reinhold 莱霍尔德·弗瑟

G

Gaede, Wolfgang 沃尔夫冈·盖德
 Galperin, F. F·嘎尔佩林
 Gamow, George 乔治·伽莫夫
 Garwin, Richard 里查德·嘎文
 Gehreke, Ernst 埃伦斯特·格尔克
 Geiger, Hans 汉斯·盖格
 Gell-Mann, Murray 穆瑞·盖尔曼
 Gorgi, Howard 霍沃德·乔治
 Gerasimovich, B. B·格拉斯莫维奇
 Gerber, Paul 保尔·格伯
 Gerlach, Walther 沃尔瑟·格拉赫
 Geroch, Robert 罗伯特·格罗赫
 Giacooni, Riccardo 里卡多·吉阿科尼
 Glaser, Donald 多纳德·格拉瑟

Glashow, Sheldon 谢尔登·格拉肖
 Goeppert-Mayer, Maria 玛利亚·哥佩特-玛耶
 Gold, Thomas 托马斯·哥尔德
 Goldberg, Joshua 约舒亚·哥尔德伯
 Goldhaber, Maurice 毛里斯·哥尔德哈伯
 Goldschmidt, Robert 罗伯特·哥尔德什米德特
 Goldschmidt, Victor 维克多·哥尔德什米德特
 Goldstein, Eugen 尤根·哥尔德斯坦
 Gordon, James 詹姆斯·戈顿
 Gordon, Walter 瓦尔特·戈登
 Goudsmit, Samuel 沙缪尔·哥德斯米特
 Gould, Gordon 戈顿·哥尔德
 Grebe, Leonhard 利昂哈德·格瑞伯
 Green, Michael 迈克·格林
 Greenberg, Oscar 奥斯卡·格林伯格
 Greenstein, Jesse 杰西·格林斯坦
 Gross, David 戴维·格罗斯
 Grossmann, Marcel 马瑟尔·格罗斯曼
 Groves, Leslie 列斯利·格罗菲斯
 Guinier, André 安德瑞·久尼尔
 Gunn, James 詹姆士·嘎恩
 Gurney, Ronald 罗纳德·格尼
 Guth, Alan 阿兰·嘎斯

H

Haas, Erich A. 埃里西·A·哈斯
 Haber, Fritz 弗里兹·哈伯
 Habicht, Conrad 康拉德·哈比齐特
 Hahn, Otto 奥托·哈恩
 Halben, Hans von 汉斯·冯哈尔本
 Hale, George 乔治·赫尔
 Hampson, William 威廉·汉姆普逊
 Harteck, Paul 保尔·哈特克
 Hartle, James 詹姆士·哈特尔
 Hawking, Stephen 斯蒂芬·霍金



Haxel, Otto 奥托·哈克瑟尔
 Hayashi, Chushiro 朱什罗·哈亚西
 Hayes, Hammond 哈蒙德·哈耶斯
 Heaviside, Oliver 奥利弗·海维赛德
 Heisenberg, Werner 维尔纳·海森伯
 Heitler, Walter 沃尔特·海特勒
 Helm, Georg 乔治·赫尔姆
 Helmholtz, Hermann von 厄曼·冯亥姆霍兹
 Herman, Robert 罗伯特·厄曼
 Hertz, Gustav 嘎斯塔夫·赫兹
 Hertz, Heinrich 亨利希·赫兹
 Herzberg, Gerhard 格尔哈德·赫兹伯格
 Hess, Victor 维克托·赫斯
 Hevesy, George 乔治·赫维西
 Hewish, Anthony 安索尼·赫维什
 Hicks, William 威廉·希克斯
 Higgs, Peter 皮特·希格斯
 Hilbert, David 戴维·希尔伯特
 Hill, Edward 爱德华·希尔
 Hilsch, Rudolf 鲁多尔夫·希尔什
 Hitler, Adolf 阿道尔夫·希特勒
 Hittorf, Johann Wilhelm 约翰·威廉·希托夫
 Hockham, George 乔治·霍克哈姆
 Hofstadter, Robert 罗伯特·霍夫斯塔特
 Holst, Gilles 吉勒斯·霍尔斯特
 Houtermans, Fritz 弗里茨·豪特曼斯
 Hoyle, Fred 弗瑞德·霍伊尔
 Hubble, Edwin 埃德文·哈勃
 Hulm, John 约翰·哈尔姆
 Hulse, Russell 拉塞尔·赫尔斯
 Hund, Friedrich 弗里德里奇·洪德

I

Infeld, Leopold 里奥波尔德·因费尔德
 Inoue, Takesi 塔克斯·因诺尔
 Ioffe, Abram 阿布拉姆·伊奥菲

Iwanenko, Dmitri 德米特里·伊万连科

J

Jacobs, Easman 伊斯特曼·雅科布斯
 Jaffé, George 乔治·雅非
 Javan, Ali 阿里·捷凡
 Jeans, James 詹姆斯·金斯
 Jensen, Hans 汉斯·詹森
 Johnson, Harry 哈里·约翰逊
 Johnson, Ralph 拉尔夫·约翰逊
 Joliot, Frédéric 弗雷德里克·约里奥
 Joliot-Curie, Irène 伊瑞妮·约里奥-居里
 Jones, Harry 哈里·约尼斯
 Jordan, Pascual 帕舒尔·约丹
 Josephson, Brian 布里安·约瑟夫森

K

Kadanoff, Leo 李奥·卡达诺夫
 Kaluza, Theodor 铁奥多·卡鲁扎
 Kantrowitz, Arthur 阿瑟·康特罗维兹
 Kao, Charles 查尔斯·考
 Kepitza, Peter 彼得·卡皮查
 Kastler, Alfred 阿尔夫瑞德·卡斯特勒
 Kaufmann, Walter 沃尔特·考夫曼
 Kayser, Heinrich 汉利希·凯瑟
 Keesom, Willem 威廉·吉瑟姆
 Kelvin, Lord 开尔文爵士
 Kemble, Edwin 埃德文·肯布尔
 Kemmer, Nicholas 尼克拉斯·克默
 Kerr, Clark 克拉克·克尔
 Kerr, Roy 罗伊·克尔
 Khariton, Iulii 尤利·卡里顿
 Khvol'son, Orest 奥瑞斯特·克沃尔逊
 Kikuchi, Chihiro 切希罗·基库奇
 Kilby, Jack 杰克·基尔比
 Killian, James 詹姆斯·基里安

Kirchhoff, Robert 罗伯特·基尔霍夫
 Kirsch, Gerhard 格哈德·克什
 Kistiakowski, George 乔治·吉斯提尔科夫斯基
 Klein, Felix 菲利克斯·克莱因
 Klein, Oskar 奥斯卡·克莱因
 Knipping, Paul 保尔·克里平
 Knudsen, Martin 马丁·克鲁德逊
 Koba, Ziro 兹罗·科巴
 Koch, William 威廉·科奇
 Kohlhörster, Werner 维尔纳·科尔赫斯特
 Kohlrausch, Friedrich 弗里德里希·科劳什
 Kohn, Walter 沃尔特·科恩
 Kol'man, Ernst 恩斯特·科尔曼
 Konopinski, Emil 埃米尔·科诺斯基
 Korn, Arthur 阿瑟·科恩
 Kossel, Walther 沃尔特·科瑟尔
 Kowarshi, Lev 列夫·科瓦斯基
 Kramers, Hendrik A. 亨德里克·A·克拉默斯
 Krarup, Carl E. 卡尔·E·克拉鲁普
 Kroll, Norman 诺曼·克罗尔
 Kronig, Ralph 拉尔夫·克朗尼希
 Kuhn, Heinrich 汉里希·库恩
 Kuhn, Thomas 托马斯·库恩
 Kurchatov, Igor 伊哥·克查托夫
 Kurlbaum, Ferdinand 费迪纳德·克尔鲍姆
 Kurti, Nicholas 尼克拉斯·克蒂
 Kusch, Polykarp 波利卡普·库什

L

Ladenburg, Rudolf 鲁多尔夫·拉顿伯格
 Lakatos, Imre 伊姆勒·拉卡托斯
 Lamb, Willis 维利斯·兰姆
 Landau, Lev 列夫·朗道
 Landé, Alfred 阿尔弗雷德·兰德

Langevin, Paul 保尔·朗之万
 Langmuir, Irving 伊尔文·朗缪尔
 Laporte, Otto 奥托·拉波特
 Lapp, Ralph 赖尔夫·拉普
 Larmor, Joseph 约瑟夫·拉摩
 Lattes, Cesare 瑟沙尔·拉特斯
 Laue, Max von 马克思·冯劳厄
 Lauritsen, Charles 查里斯·劳里森
 Lawrence, Ernest 恩斯特·劳伦斯
 LeBon, Gustave 嘎斯塔夫·列邦
 Lederman, Leon 利昂·列德曼
 Lee, Benjamin 贝亚明·李
 Lee, Tsung Dao 李政道
 Lemaître, Georges 乔治斯·列马特瑞
 Lenard, Philipp 菲力普·勒纳德
 Lenin, Vladimir 弗拉吉米尔·列林
 Lenz, Wilhelm 威廉·楞茨
 Leprince-Ringuet, Louis 路易斯·列普林斯-里因奎特
 Lewis, Gilbert N. 吉尔伯特·列维斯
 Lieben, Robert von 罗伯特·冯里本
 Linde, Andrei 安德列·林德
 Linde, Carl von 卡尔·冯林德
 Lindemann, Frederick 弗雷德里克·林德曼
 Lippmann, Gabriel 加布里尔·李普曼
 Livingston, M. Stanley M·斯坦利·利文斯顿
 Lockyer, Norman 诺曼·罗克耶
 Lodge, Oliver 奥利弗·劳德吉
 Lommel, Eugen 尤根·罗美尔
 London, Fritz 弗里兹·伦敦
 London, Heinz 海因兹·伦敦
 Lorentz, Henrik A. 亨利克·洛伦兹
 Lüders, Gerhard 格尔哈德·留德斯
 Lummer, Otto 奥托·鲁梅
 Lyman, Theodore 铁多尔·莱曼



Lyttleton, Raymond 瑞芒·里特列顿

M

Mach, Ernst 厄恩斯特·马赫

Madelung, Erwin 埃尔文·马德隆

Magie, William 威廉·马吉

Mahmod, Hormoz 霍莫兹·马莫德

Maiman, Theodore 铁奥多·梅曼

Majorana, Ettore 埃托尔·马约拉纳

Maksimov, Alexander 阿列克赛·马克西莫夫

Marcuse, Herbert 赫尔伯特·马库斯

Marsden, Ernest 欧内斯特·马斯顿

Marshak, Robert 罗伯特·马沙克

Matthias, Bernd 伯恩德·马塞厄斯

Maurer, Robert 罗伯特·毛瑞尔

Maxwell, James Clerk 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦

Mayer, Alfred M. 阿尔弗雷德·迈耶

Mayer, Maria Goeppert 玛丽亚·乔佩特·迈耶

McCormach, Russell 拉塞尔·麦克科马赫

McCrea, William 威廉·麦克科里

McMillan, Edwin 埃德文·麦克米伦

McVittie, Georges 乔治·麦克维蒂

Meissner, Walther 沃尔瑟·迈斯纳

Meitner, Lise 李瑟·迈特勒

Merton, Robert K. 罗伯特·梅尔顿

Michelson, Albert 阿尔伯特·迈克耳孙

Mie, Gustav 嘎斯塔夫·米

Millikan, Robert 罗伯特·密立根

Mills, Robert 罗伯特·米尔斯

Milne, Edward 爱德华·米尔恩

Minkowski, Hermann 赫尔曼·闵可夫斯基

Misner, Charles 查尔斯·米斯纳

Mitkevich, Vladimir 弗拉吉米尔·米特科维奇

Möller, Christian 克里斯蒂安·莫勒

Morley, Edward 爱德华·莫利

Morrison, Philip 菲力普·莫里逊

Morse, Philip 菲力普·莫尔斯

Moseley, Henry 亨利·莫斯利

Moser, L. F. L. F. 莫瑟

Mosotti, Ottaviano 奥塔维阿诺·莫苏第

Mössbauer, Rudolf 鲁道尔夫·穆斯堡尔

Mott, Nevill 尼维尔·莫特

Müller, K. Alex 阿列克斯·缪勒

Müller, Walther 沃尔瑟·缪勒

Müller, Wilhelm 威廉·缪勒

Mulliken, Robert 罗伯特·马利肯

Murphy, George 乔治·默菲

Mussolini, Benito 本尼托·墨索里尼

N

Nakano, Tadao 塔岛·纳卡诺

Nambu, Yoichiro 约奇罗·纳姆布

Narlikar, Jayant 雅杨特·纳利卡

Neddermeyer, Seth 瑟斯·路德梅耶

Ne'eman, Yuval 尤瓦·列耶曼

Nernst, Walther 沃尔特·能斯特

Neveu, André 安德瑞·尼菲

Newcomb, Simon 西蒙·纽堪布

Nicholson, John W. 约翰·尼科尔逊

Nicolai, Georg 乔治·尼可拉

Niessen, Karl F. 卡尔·尼森

Nikol'skii K. V. K. V. 尼可尔斯基

Nishijima, Kazuhiko 卡阻希科·尼西吉马

Nishima, Yoshio 仁科方雄

Nobel, Alfred 阿尔弗雷德·诺贝尔

Noddack, Ida 伊达·诺达克

Noddack, Walter 沃尔特·诺达克

Nordheim, Lothar 罗瑟·纳德哈姆

Nordström, Gunnar 冈纳·诺德斯特罗姆

Novikov, Igor 伊戈·诺维科夫

Noyce, Robert 罗伯特·诺伊斯
 Nuttall, John 约翰·纳托尔
 Nyquist, Harry 哈里·尼奎斯特

O

Occhialini, Giuseppe 古瑟佩·奥克希阿里尼
 Ochsenfeld, Robert 罗伯特·奥奇森菲尔德
 Oldenberg, Otto 奥托·欧登伯格
 Olszewski, Karol 卡罗尔·奥尔泽乌斯基
 Onnes, Kamerlingh 凯末林·昂尼斯
 Oppenheimer, Frank 弗兰克·奥本海默
 Oppenheimer, J., Robert 罗伯特·奥本海默
 Oseen, Carl 卡尔·欧辛
 Ostwald, Ludwig 路德维希·奥斯特瓦尔德

P

Paris, Abraham 阿布拉罕·帕斯
 Panofsky, Wolfgang 沃夫冈·帕诺夫斯基
 Paschen, Friedrich 弗里德利希·帕森
 Pasternack, Simon 西蒙·帕斯特纳克
 Pasteur, Louis 路易斯·帕斯特
 Pati, Jogesh 约吉什·帕蒂
 Pauli, Wolfgang 沃尔夫冈·泡利
 Pauling, Linus 李纳斯·泡林
 Pearson, Karl 卡尔·皮尔逊
 Peebles, James 詹姆斯·皮珀斯
 Peierls, Rudolf 鲁道夫·帕尔斯
 Penrose, Roger 罗杰·彭罗斯
 Penzias, Arno 阿诺·彭齐亚斯
 Perkins, Donald 多纳尔德·佩金斯
 Perl, Martin 马丁·佩尔
 Perrier, Carlo 卡罗·佩利尔
 Perrin, Jean 简·佩兰
 Petzsch, Konstantin 康斯坦丁·佩特兹哈克
 Peterson, Hans 汉斯·彼特森
 Picard, Charles 查里斯·皮卡德

Piccard, Auguste 奥古斯特·皮卡德
 Piccioni, Oreste 奥瑞斯特·皮斯奥尼
 Pictet, Raoul 诺尔·皮克忒特
 Pines, David 戴维·潘尼斯
 Pius XII, Pope 罗马教皇皮阿斯十二世
 Planck, Max 马克斯·普朗克
 Plücker, Julius 久利阿斯·普吕克
 Podolsky, Boris 波里斯·波多尔斯基
 Pohl, Robert 罗伯特·泊尔
 Poincaré, Henri 亨利·庞加莱
 Politzer, David 戴维·波利泽
 Polyakov, Alexander 亚历山大·波利雅可夫
 Pontecorvo, Bruno 布鲁诺·庞特科沃
 Popper, Karl 卡尔·波普尔
 Pound, Robert 罗伯特·庞德
 Powell, Cecil 塞西尔·鲍威尔
 Price, Paul Buford 保尔·巴弗德·普赖斯
 Pringsheim, Ernst 恩斯特·普林汉姆
 Prokhorov, Alexander 亚历山大·普罗霍罗夫
 Prout, William 威廉·普罗特
 Puppi, Michael 迈克·普平
 Puppi, Giovanni 吉奥范尼·普皮
 Purcell, Edward 爱德华·佩塞尔

Q

Quinn, Helen 赫伦·蒯因

R

Rabi, Isidore 伊西多·拉比
 Rabinowitch, Eugene 尤金·拉宾诺维奇
 Rada, Giulio 金利欧·拉卡
 Rainwater, James 詹姆斯·雷思瓦特
 Ramsauer, Carl 卡尔·雷姆绍尔
 Ramsay, William 威廉·拉姆齐
 Rasetti, Franco 弗朗科·拉瑟蒂
 Rayleigh, Lord 瑞利爵士



- Rebka, Glen 格楞·瑞布卡
 Regener, Erich 埃里奇·瑞吉纳
 Reiche, Fritz 弗里兹·瑞奇
 Reines, Frederick 弗瑞德里克·莱尼斯
 Rescher, Nicholas 尼古拉斯·瑞歇尔
 Retherford, Robert 罗伯特·瑞瑟弗德
 Richardson, Owen 欧文·理查逊
 Richeter, Burton 贝顿·里克特
 Rickover, Hyman 海曼·里科夫
 Riecke, Eduard 埃丢尔德·里克
 Riezler, Wolfgang 沃尔夫冈·里兹勒
 Righi, Augusto 奥古斯托·里奇
 Robertson, Howard 霍沃·罗伯逊
 Robson, J. M. J. M·罗布逊
 Rochester, George 乔治·罗彻斯特
 Roosevelt, Franklin D. 弗朗克林·卢斯
 菲尔德
 Rosen, Nathan 纳桑·罗森
 Roseberg, Alfred 阿尔弗雷德·罗森伯
 Rosenfeld, Léon 里昂·罗森费尔德
 Rosenkevich, Lev 列夫·罗森科维奇
 Rosenthal-Schneider, Ilse 爱尔瑟·罗森
 撒尔-施内迪
 Rossi, Bruno 布鲁诺·罗西
 Rowland, Henry 亨利·罗兰
 Royds, Thomas 汤姆斯·劳伊兹
 Ruark, Arthur 阿瑟·鲁阿克
 Rubbia, Carlo 卡罗·鲁比亚
 Rubens, Heinrich 海利希·鲁本斯
 Rubinowicz, Adalbert 阿达尔贝特·卢宾诺
 维兹
 Rust, Bernhard 贝恩哈德·卢斯特
 Rutherford, Bernhard 欧内斯特·卢瑟福
 Ryle, Martin 马丁·莱尔
 S
 St. John, Charles E 查利斯·圣约翰
 Sakata, Shoichi 绍伊奇·萨卡塔
 Sakharov, Andrei 安德瑞·萨卡罗夫
 Salam, Abdus 阿布达斯·萨拉姆
 Salpeter, Edwin 埃德文·沙尔皮特
 Samios, Nicholas 尼可拉斯·萨米奥斯
 Sandage, Allan 阿兰·桑德吉
 Savitch, Pavel 帕菲尔·萨维奇
 Scaff, Jack 杰克·斯卡夫
 Schawlow, Arthur 阿瑟·索洛夫
 Scheel, Karl 卡尔·席尔
 Schild, Alfred 阿尔弗雷德·施尔德
 Schmidt, Gerhard 格哈德·斯米特
 Schmidt, Maarten 马登·什米德
 Schott, George A. 乔治·绍特
 Schottky, Walter 沃尔特·肖特基
 Schramm, David 戴维·施拉姆
 Schrieffer, Robert 罗伯特·施里弗
 Schrödinger, Erwin 埃尔文·薛定谔
 Schubnikov, Lew 留·舒布尼科夫
 Schwartz, Charles 查尔斯·施瓦兹
 Schwartz, Melvin 梅尔芬·施瓦兹
 Schwarz, John 约翰·施瓦兹
 Schwartzschild, Karl 卡尔·史瓦西
 Schweber, Sam 萨姆·施韦柏
 Schweidler, Egon von 埃冈·冯施怀德勒
 Schwinger, Julian 朱里安·施温格
 Seaborg, Glenn 格伦·西伯格
 Segré, Emilio 埃米里欧·瑟格瑞
 Seitz, Fredrick 弗雷德里克·塞兹
 Serberm, Robert 罗伯特·塞尔伯
 Shannon, Claude 克劳德·申农
 Shimizu, T. T. 什米
 Shockley, William 威廉·肖克利
 Siegbahn, Manne 曼尼·西格本
 Siemens, Werner von 维纳·冯西门子
 Silberstein, Ludwik 路德维克·斯尔贝斯坦

Simon, Franz 弗兰兹·西门
 Slater, John 约翰·斯拉特
 Sloan, David 戴维·斯龙
 Snell, A. H. A. H. 斯内尔
 Snyder, Hartland 哈特兰德·斯尼德
 Soddy, Frederic 弗勒德里克·索第
 Solomon, Jacques 杰克斯·所罗门
 Solvay, Ernest 埃内斯特·索尔维
 Sommerfeld, Arnold 阿诺尔德·索末菲
 尔德
 Sparks, Morgan 摩根·斯巴克斯
 Spedding, Frank 弗兰克·斯佩丁
 Spengler, Oswald 奥斯瓦尔德·斯彭勒
 Spitzer, Lyman 李曼·斯皮泽
 Sponer, Hertha 赫尔塔·斯帕纳
 Stark, Johannes 约翰尼斯·斯塔克
 Starobinski, Alexei 阿列克赛·斯塔罗宾斯基
 Steigman, Garg 嘎里·斯塔格曼
 Stefan, Josef 约瑟夫·斯忒藩
 Steinberger, Jack 杰克·斯坦贝格
 Steinhardt, Paul 保尔·斯坦哈德
 Sterne, T. E. 斯特尼
 Stokes, Gabriel 盖布里尔·斯托克斯
 Stoney, George Johnstone 乔治·约翰斯
 通·斯通尼
 Strassmann, Friedrich 弗利德利希·斯特拉
 斯曼
 Strauss, Lewis 刘易斯·斯特劳斯
 Street, Jabez 杰贝兹·斯特里特
 Struik, Dirk 德克·斯特鲁克
 Stueckelberg, Ernst 恩斯特·斯丘克伯格
 Suess, Hans 汉斯·舒斯
 Sutherland, William 威廉·舒瑟兰德
 Szilard, Leo 利奥·斯兹纳德

T

Taketani, Mituo 米屠欧·塔卡坦尼

Tamm, Igor 伊戈·塔姆
 Tanikawa, Yasutaka 雅舒塔·卡坦尼卡瓦
 Taylor, Joseph 约瑟夫·泰勒
 Teal, Gordon 戈顿·蒂尔
 Telegdi, Valentine 瓦伦丁·特勒格迪
 Teller, Edward 爱德华·泰勒
 Thompson, Robert 罗伯特·汤姆孙
 Thompson, George P. 乔治·汤姆孙
 Thomson, Joseph J. 约翰·汤姆孙
 Thomson, William 威廉·汤姆孙
 Thonemann, Peter 彼特·托尼曼
 Thorne, Kip 吉普·索恩
 Thornton, R. R. 索恩顿
 Timiriazev, Kliment 克里门特·提米里阿
 哲夫
 Ting, Samuel 萨缪尔·廷
 Tolman, Ricgard C. 里查德·托尔曼
 Tomaschek, Rudolf 鲁多尔夫·托马斯雪克
 Tomonaga, Sin-Itiro 幸尼蒂罗·托马纳嘎
 Townes, Charles 查尔斯·汤斯
 Townes, John 约翰·汤森德
 Travers, Morris 莫利斯·特拉夫斯
 Trowbridge, John 约翰·特罗布里奇
 Tryon, Edward 爱德华·特里昂
 Turlay, René 瑞尼·特里

U

Uhlenbeck, George 乔治·乌伦贝格
 Ulam, Stanislaus 斯坦尼斯劳斯·乌拉姆
 Urey, Harold 哈罗尔德·乌瑞

V

Vande Graaf, Robert 罗伯特·范德格拉夫
 Van Vleck, John 约翰·范弗列克
 Vaschy, Aimé 埃梅·瓦希
 Veblen, Oswald 奥斯瓦尔德·维布楞



Veksler, Vladimir 弗拉基米尔·维克斯勒
 Veneziano, Gabriele 嘎布里勒·维尼兹阿诺
 Vilenkin, Alexander 亚历山大·维伦金
 Villard, Paul 鲍尔·维拉德
 Voigt, Woldemar 沃尔德马·沃依格特

W

Waals, Van der 范德瓦尔斯
 Walke, Harold 哈罗德·沃尔克
 Walker, Arthur 阿瑟·沃尔克
 Walton, Ernest 恩斯特·沃尔顿
 Warburg, Emil 埃米尔·瓦伯格
 Ward, John C. 约翰·沃德
 Warschauer, Douglas 多格拉斯·瓦绍尔
 Wataghin, Gleb 格列布·瓦塔格因
 Weber, Heinrich 海因利希·韦伯
 Weber, Joseph 约瑟夫·韦伯
 Weber, Wilhelm 威廉·韦伯
 Wehnelt, Arthur 阿瑟·维内尔特
 Weinberg, Alvin 阿尔芬·温伯格
 Weinberg, Steven 斯蒂芬·温伯格
 Weinreich, Marcel 马瑟尔·温里奇
 Weissberg, Alexander 亚历山大·维斯伯格
 Weisskopf, Victor 维克托·维斯科普夫
 Weizsäcker, Friedrich von 弗里德里希·冯维兹瑟克
 Wells, H. G. 亨·格·维尔斯
 Wentzel, Gregor 格雷戈·温泽尔
 Weyl, Hermann 厄曼·外尔
 Weyland, Paul 保尔·卫兰德
 Wheeler, John A. 约翰·惠勒
 Whitehead, Alfred North 阿尔弗雷德·诺斯·怀特海
 Whitrow, Gerald 格拉尔德·维特罗
 Wiechert, Emil 埃米尔·维彻特

Wiegand, Clyde 克拉德·维冈德
 Wien, Max 马克思·维恩
 Wien, Wilhelm 威廉·维恩
 Wigner, Eugene 尤金·维格纳
 Wilczek, Frank 弗朗克·维尔兹克
 Wilkins, Maurice 毛里斯·维尔金斯
 Wilson, Alan 阿兰·威尔逊
 Wilson, Charles T. R. 查利斯·威尔逊
 Wilsen, Harold A. 哈罗德·威尔逊
 Wislon, Robert 罗伯特·威尔逊
 Wilson, Robert W. 罗伯特·W·威尔逊
 Winkler, Clemens 克列门斯·温克勒
 Witten, Edward 爱德华·维顿
 Wood, Robert 罗伯特·伍德
 Wroblewski, Szymon S. 乌诺布列斯基
 Wu, Chien-Shiung 吴健雄
 Wu, Maw-Kuen 吴卯昆
 Wynne, W. P. 维尼

Y

Yang, Chen Ning 杨振宁
 Yoshimura, Motohiko 吉村
 Ypsilantis, Thomas 托马斯·乌普斯朗迪斯
 Yukawa, Hideki 汤川秀树

Z

Zacharias, Jerrold 杰罗尔德·扎恰里阿斯
 Zangger, Heinrich 海因利希·赞格
 Zecman, Pieter 皮特·塞曼
 Zeiger, Herbert 赫尔伯特·扎格
 Zermelo, Ernst 恩斯特·泽尔玫罗
 Zöllner, Karl-Friedrich 卡尔-弗里德利希·泽尔纳
 Zumino, Bruno 布鲁诺·朱米诺
 Zweig, George 乔治·兹外希



19世纪末，有些物理学家认为：物理学底层的基本原理业已知道，未来物理学的工作将只是填补细节。他们的看法是极其错误的。过去的一个世纪，目睹了量子力学、相对论、宇宙学、粒子物理学与凝聚态物理学，以及其他领域的崛起。这些学科基本上改变了我们对于空间、时间与物质的理解。它们也改变了我们的日常生活，掀起了包括无线电、电视、激光、核能与计算机的发展在内的一场技术革命。在《量子世代》中，赫尔奇·克劳，一位世界领军级的物理学史家，对于过去一百年的这些非凡成就，提供了一览无遗的说明。

“一部易读和极有价值的著作。”

——格拉罕·法梅罗，《自然》

“这是一部有雄心的单卷史书，第一部论及20世纪知识史中大部分有意义方面的综合性教程。克劳的成就是十分令人瞩目的……一部不可缺少的资源。”

——戴安娜·巴肯，《物理学世界》

“不是专业性学术著作，也不只是通俗读物……综合性、极翔实与精心解说……它是一本令人钦佩的参考书，是一本严肃的、值得一读的书。”

——《出版周刊》

上架建议：科普类

ISBN 978-7-5357-5628-2



9 787535 756282 >

定价：39.50 元